



UNIVERSITÉ DE LILLE
FACULTÉ DE MÉDECINE HENRI WAREMBOURG
Année : 2023

THÈSE POUR LE DIPLÔME D'ÉTAT
DE DOCTEUR EN MÉDECINE

***Apport du machine learning en simulation médicale :
Une étude exploratoire de détection du stress en simulation fautive de fidélité sur le
centre présage***

Présentée et soutenue publiquement le 4 avril 2023 à 14h00
au Pôle Formation

par Thibaut DENIS

JURY

Président :

Monsieur le Professeur *Renaud JARDRI*

Assesseurs :

Monsieur le Professeur *Mohamed DAOUDI*

Directeur de thèse :

Monsieur le Professeur *Ali AMAD*

Avertissement

La Faculté n'entend donner aucune approbation aux opinions émises dans les thèses : celles-ci sont propres à leurs auteurs.

Sigles

BVP - Blood Volume Pulse

CNN – Convolutional Neural Network

DL – Deep Learning

GR - Glucocorticoïdes

HAS - Haute Autorité en Santé

HPA – hypothalamic-pituitary-adrenal axis

IBI – Inter Beat Interval

ML – Machine Learning

MR – Minéralo-corticoïdes

NLP – Natural Language Processing

RNN – Recurrent neural network

RNA – Réseau de neurones artificiels

SNA – Système Nerveux Autonome

SPD – Matrice définie positive

TEMP – Température

Sommaire

Table des matières

Avertissement	2
Remerciements	<i>Erreur ! Signet non défini.</i>
Sigles	3
Sommaire	4
Résumé	7
Introduction	9
1 Simulation en santé	9
1.1 Définition	9
1.2 Histoire de la simulation en santé	10
1.3 Principes, intérêt et taxonomie de la simulation en santé.....	11
1.3.1 Principes	11
1.3.2 Intérêt et justification de la pratique de simulation	13
La qualité des apprentissages.....	13
Une évolution sociétale et éthique de l'enseignement dans le domaine de la santé	13
Une disponibilité des ressources didactiques.....	14
1.3.3 Taxonomie des différents types de simulation.....	14
1.4 Le centre de simulation de l'université de Lille - PRESAGE.....	15
1.5 Recherche en simulation en santé	16
2. Algorithmes et apprentissage automatique	17
2.1 Informatique et apprentissage automatique	17
2.1.1 De la Naissance de l'informatique moderne, à l'intelligence artificielle	17
2.1.2 Les algorithmes et la programmation	18
2.1.3 Des sciences cognitives à l'intelligence artificielle.....	19
2.2 Les bases de l'apprentissage automatique	20
2.2.1 Le neurone comme modèle de base	20
2.2.2 Le neurone formel ou artificiel	21
2.2.3 Les réseaux de neurones	22
2.3 Informatique affective et détection du système de stress.....	23
3 Le système de stress	25
3.1 Aux origines du concept	25
3.2 Eustress, distress, et charge allostatique	26
3.3 Mécanismes du système de stress.....	27
3.3.1 Dimension biologique	27
3.3.2 Dimension perceptive	28
3.3.4 Dimension émotionnelle	29
3.4 Le système de stress et la simulation en santé	31
Le projet ASH – Adaptive Simulation in Healthcare	33
1 Description	33
2 Objectifs du travail de thèse	34
2.1 Objectifs principaux et secondaires	34
2.2 Type d'étude	34
Méthode et étapes du projet	35

1 Protocole expérimental	35
1.1 Codage de l'algorithme	35
1.2 Vérification de la vérité de terrain	36
1.3 Développement de l'interface graphique	36
1.4 Test de l'interface graphique et faisabilité	37
2 Participants et scénarii	37
3 Déroulé des séances de simulation	38
Briefing	39
Simulation	39
Débriefing	40
4 Capteurs et signaux	40
4.1 Le signal AED	41
4.2 Le signal BVP	41
4.3 Température corporelle	42
4.4 Prétraitements des données	43
5 Échelles psychométriques	43
5.1 Self Assesment Manikin	43
5.2 Inventaire d'anxiété état - STAI -YE	44
5.3 Échelle de Likert sur le niveau de compétence perçue et la difficulté de la tâche	44
6 Comité éthique	45
Résultats	46
ÉTAPE 1 : Création de l'algorithme	46
1.1 Cadre géométrique pour la détection du stress	46
Fusion des signaux multimodaux et géométrie riemannienne	46
Classifieur de type Long Short-Term Memory (LSTM)	47
1.2 Données d'entraînement	48
1.3 Mesure de la performance	49
ÉTAPE 2 Contrôle de la vérité de terrain	50
2.1 Données psychométriques	50
2.2 Étiquette de valence et d'arousal	51
ÉTAPE 3 : Création de l'interface graphique	52
ETAPE 4 : Test de l'interface graphique	53
Discussion	57
1 Synthèse des résultats	57
2 Discussion des résultats	57
Limites	57
Forces	61
3 Le machine learning dans le domaine des sciences affectives et la détection du système de stress	62
2.1 Une absence de consensus	62
3.2 La complexité des systèmes biologiques	63
3.3 L'avenir de l'apprentissage profond en condition naturelle	65
4 Le machine Learning et le processus pédagogique	65
4.1 Innovation technologique et éducation : une histoire ancienne	65
4.2 Le dialogue complexe entre neurosciences et sciences de l'éducation	67
5 Le Machine Learning et les enjeux éthiques	67
Le principe du bien être	68
Le principe de respect de l'autonomie	69
Le principe de protection de l'intimité et de la vie privée	69
Le principe de participation démocratique	69

Le principe d'inclusion de la diversité	70
Le principe de prudence	70
Conclusion	71
Références	72
Annexes.....	79
1 Scénario Agitation & éléments de trame.....	79
2 Scénario Risque suicidaire & éléments de trame.....	81

Résumé

Apport du machine learning en simulation médicale : une étude exploratoire de détection du stress en simulation haute fidélité sur le centre PRÉSAGE

Contexte : Le centre de simulation en santé PRESAGE (Plateforme de Recherche et d'Enseignement par la Simulation pour l'Apprentissage des Attitudes et des Gestes) de la faculté de médecine de Lille se donne pour mission de former les étudiants et les professionnels durant des simulations dites en haute-fidélité. Point crucial dans le processus d'apprentissage, les débriefings reposent historiquement sur des méthodes d'analyse subjective des différentes séquences de simulation. Les avancées dans le domaine de l'informatique affective ouvrent de nouvelles perspectives via l'utilisation de l'intelligence artificielle. En étudiant les phénomènes de stress inhérent à la simulation haute-fidélité, le projet ASH – Adaptive Simulation in Healthcare – se donne pour mission de développer des nouvelles technologies d'apprentissage. L'objectif est d'identifier de manière objective l'activation du système de stress des apprenants durant des séquences de simulation afin d'améliorer la qualité des débriefings et ainsi développer une approche centrée sur le vécu interne des étudiants.

Méthode : En partenariat avec le laboratoire CRISTAL (Centre de Recherche en Informatique, Signal et Automatique de Lille) une étude prospective exploratoire a été menée durant les années universitaires 2020-2022. Des internes et des étudiants en santé ont été inclus au volontariat lors de session de simulation sur l'évaluation du risque suicidaire et la gestion d'une agitation. Un dispositif portable non invasif de type EMPATICA© a permis d'enregistrer des variables physiologiques comprenant la conductance électrodermale

(AED), la température corporelle (TEMP) et la variabilité du rythme cardiaque (HRV) des participants. L'entraînement de l'algorithme s'est appuyé sur les données publiques WESAD comprenant 15 sujets enregistrés dans des conditions expérimentales. Les résultats de notre méthode de classification ont été confrontés à un ensemble de mesures subjectives répétées afin de contrôler la vérité de terrain. À partir de l'ensemble de ces données, le projet s'est articulé autour de quatre grandes étapes : le développement d'un algorithme de détection intégrant des données multimodales, le contrôle de la vérité de terrain, la création d'une interface graphique, et un test en condition réelle.

Résultats : Nous avons développé un algorithme de classification des séquences de simulation en utilisant un cadre géométrique riemannien associé à un réseau de neurones artificiel de type Long Short Term Memory (LSTM). La méthode s'est révélée conforme à l'état de l'art avec un taux de précision de 93,47% et un F1 Score de 93,25%. Le test en condition réelle a permis d'obtenir une vérité de terrain comprenant 33 étiquettes conformes aux prédictions de notre algorithme. L'utilisation exploratoire de l'interface en condition réelle a montré un niveau de satisfaction positif.

Conclusion : Il s'agit d'une première preuve de concept de la faisabilité et de l'utilité d'une méthode de détection du système de stress se basant sur un cadre géométrique riemannien. Néanmoins, la généralisation de ces méthodes reste limitée par des concepts trop permissifs et des modèles expérimentaux n'intégrant pas suffisamment la dimension contextuelle des signaux. Enfin l'acceptabilité dans le domaine de la pédagogie nécessite une réflexion éthique attentive.

Introduction

1 Simulation en santé

1.1 Définition

La simulation en santé est depuis une dizaine d'années une pratique intégrée dans le domaine de la formation initiale et continue des professionnels de santé en France. Développée de manière plus importante en Amérique, elle bénéficie en France d'une recommandation de bonne pratique depuis 2011, dans les suites du rapport de la Haute Autorité de santé (HAS) [1].

Selon la HAS, le terme simulation en santé correspond à « l'utilisation d'un matériel (comme un mannequin ou un simulateur procédural) de la réalité virtuelle ou d'un patient standardisé pour reproduire des situations ou des environnements de soin, dans le but d'enseigner des procédures diagnostiques et thérapeutiques et de répéter des processus, des concepts médicaux ou des prises de décision par un professionnel de santé ou une équipe de professionnels ».

Elle est présentée par la HAS dans sa recommandation de bonne pratique comme « une méthode pédagogique active et innovante, basée sur l'apprentissage expérientiel et la pratique réflexive » (1). Néanmoins, l'histoire de l'enseignement de la médecine nous permet d'appréhender ces modèles pédagogiques « innovant » dans le temps long de la médecine.

1.2 Histoire de la simulation en santé

Les premières traces de simulation dans le domaine de la pédagogie et de la médecine datent de l'antiquité à travers des modèles de statuettes en argile représentant divers entités cliniques [2]. De même l'acte de simuler à des fins d'enseignement jalonne l'histoire de la médecine, l'utilisation des cadavres comme outils de simulation fonde la transmission des savoirs dans le domaine de la chirurgie [3], notamment au travers des « Leçons d'anatomie » représentées dans de nombreuses iconographies (**figure 1.A**).

En France l'utilisation de mannequin dans l'enseignement de la médecine est décrite dès le XVIIIe siècle avec la machine de Madame du Coudray (1714-1789) (**Figure 1.B**) autour des soins obstétriques. Il s'agissait alors d'enseigner aux matrones à l'aide de ces mannequins « standardisés » sur le territoire français dans l'objectif de réduire la mortalité infantile et maternelle pendant l'accouchement. Durant 25 ans, plusieurs milliers de femme auraient été formés à l'aide de ce dispositif [4].



Figure 1. A) À gauche, La Leçon d'anatomie du docteur Tulp. 1632. Rembrandt. B) À droite, la Machine de Madame de Coudray, © Musée d'Histoire de la Médecine de Rouen.

Les 1^{er} mannequins modernes datent du début des années 1950 notamment grâce aux avancées techniques. On peut citer le Dr Peter Safar dans la conception d'un mannequin réaliste autour des manœuvres de réanimations cardiopulmonaires et la manœuvre du

bouche à bouche [2]. De même, en 1968, le Dr Michael Gordon présente un des tout premier simulateur implémenté de différentes technologies permettant de simuler différentes pathologies cardiaques. Le développement du matériel informatique dans les années 80-90, couplé à des intérêts éthiques et à la disponibilité du matériel didactique permettra à la simulation médicale de prendre une place de plus en plus importante dans le domaine de l'enseignement médical.

1.3 Principes, intérêt et taxonomie de la simulation en santé

1.3.1 Principes

Le développement de la simulation dans le domaine de la santé et de la formation des futurs professionnels s'inscrit dans le champ des sciences de l'éducation, courant née au début du XXe siècle. La pédagogie quitte le champ de la théologie et de la philosophie pour s'organiser comme un champ de recherche à part entière [5] concomitamment à l'émergence de paradigmes positivistes et réalistes [6]. La triangulation entre l'apprenant, les contenus des savoirs et l'enseignant [7] (**Figure 2**) sous-tend également un ensemble de paradigme modélisant les différentes interactions, les conceptions des modalités des transferts des savoirs, et des notions mêmes d'apprenants et d'enseignants.

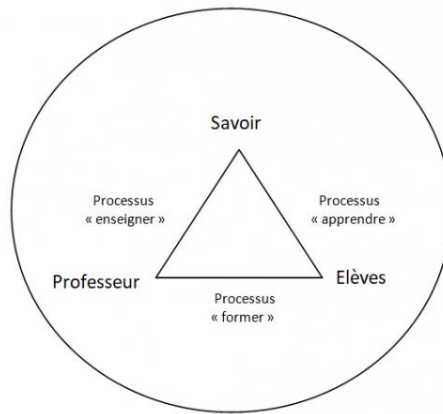


Figure 2 Le triangle pédagogique d'après Houssaye, [7]

Ainsi la notion de pédagogie « active » appartient au courant dit « humaniste », autour de la notion d'un « homme adulte agissant en fonction des facteurs de motivations intrinsèques et en capacité de s'autoréguler et d'auto-diriger sa formation »[5]. Parmi les principaux auteurs et principes sous tendant cette approche on peut citer :

- la notion d'andragogie de Malcom Knowles formalisé en 1984 [8] autour des notions d'apprentissage des adultes et leurs spécificités.
- l'apprentissage réflexif de Donald Schön [9]. Dans son modèle, il décrit en détail une approche qui implique un encadrement actif par un maître enseignant - en donnant aux étudiants la possibilité de faire face à des problèmes réels, de tester des solutions, de faire des erreurs, de demander de l'aide et d'affiner les approches.
- L'apprentissage expérientiel, néologisme issu de la traduction de «l'experiential learning», modalisé notamment par Kolb en 1984 [10]. Celui-ci modélise le processus de transformation par la dialectique entre concepts abstraits et expérience concrète.

Enfin l'usage du jeu dans l'apprentissage, le « faire comme si » s'inscrit dans un processus développemental qui dépasse largement l'enfance : depuis Jean Piaget (1956), le jeu fait partie de « l'intelligence de l'enfant, parce qu'elle représente l'assimilation fonctionnelle ou

reproductive de la réalité » [11]. De même Winnicott décrit le caractère fondamental du jeu dans le processus développemental [12]. La place du jeu dans les phénomènes mentaux est donc connue et reconnue de l'enfance à l'âge adulte. Mais au-delà de la dimension simplement ludique, le jeu en lien avec un dispositif de simulation permet de fixer des règles et des limites permettant d'explorer dans un contexte sécurisé, les zones de développement les plus proches propre à chaque individu.

1.3.2 Intérêt et justification de la pratique de simulation

La qualité des apprentissages

Une littérature scientifique montre l'intérêt de la simulation en santé dans l'acquisition des compétences, dans l'enseignement des compétences techniques ou non techniques comme la formation à la communication [13]. En effet, la recherche en science de l'éducation a montré que la pédagogie active pouvait augmenter les performances d'apprentissages des apprenants en science, en mathématique ou en science de l'ingénieur [14]. De plus, la simulation répond ainsi au besoin de formation dans le domaine des gestes techniques invasifs à l'image des soins gynécologiques, ou encore des soins de critique de réanimation. L'apprentissage de compétences communicationnelles telles que l'annonce d'une fin de vie ou d'une maladie grave y est également possible.

Une évolution sociétale et éthique de l'enseignement dans le domaine de la santé

Les évolutions sociétales autour des droits des usagers des services de santé ont progressivement questionné les apprentissages « traditionnels » dit au « lit du malade ».

L'expression « jamais la première fois sur le patient » reprise dans le rapport de mission de la HAS [1] pointe les enjeux éthiques sous-jacents à ces évolutions. La formation dans le domaine des gestes techniques invasifs à l'image des soins gynécologiques, obstétricaux, ou encore des soins critique de réanimation, ont logiquement pris une place importante dans les centres de simulation.

Une disponibilité des ressources didactiques

Les situations d'apprentissage dans la « vraie vie » sont parfois rares, parfois complexes, et très souvent coûteuses. La création de dispositif de simulation s'inscrit dans une meilleure accessibilité à ces situations, en garantissant à l'ensemble des futurs professionnels de santé un accès au-delà de la contingence de leurs parcours de formation respectif. En effet, l'arrêt cardiorespiratoire, la gestion d'une agitation aigue dans un contexte d'urgence, et le débriefing des erreurs dans leurs prises en charge, inhérent au processus d'apprentissage, sont logiquement limités dans un contexte hospitalier.

1.3.3 Taxonomie des différents types de simulation

Afin de différencier les types de simulation, une proposition de classification des simulations a été proposée par certains auteurs . Elle se base notamment sur les différents outils mis en jeu (humain, synthétique, électronique) (**Figure 3**). Les patients standardisés présentent un intérêt majeur dans les situations mettant en jeu des compétences non techniques autour du raisonnement clinique en situation complexe (à l'image d'une évaluation du risque suicidaire) ou encore l'annonce d'un diagnostic de maladie complexe.

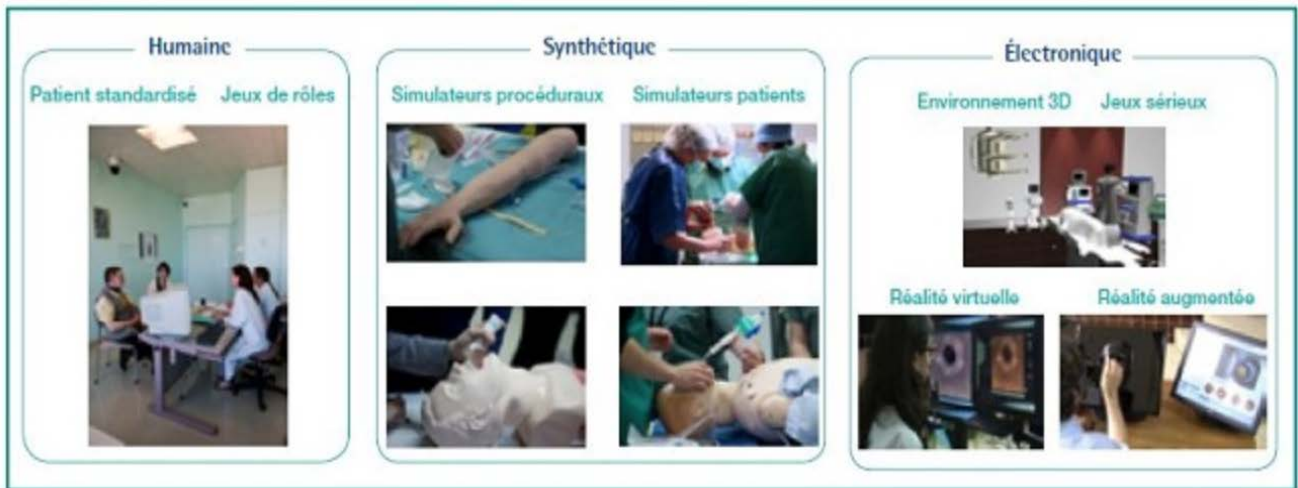


Figure 3 Les types de simulations - D'après la HAS - Simulation en santé [1,15]

Une distinction est également faite entre :

- 1) Les simulations procédurales dites de basse fidélité autour d'un geste technique spécifique ;
- 2) Les simulations hautes fidélités, dont l'objectif est de maximiser la réalité des situations reproduites, autour de mannequin grandeur nature, piloté par ordinateur ou par des ingénieurs pédagogiques ;
- 3) Enfin les simulations dites hybrides, pouvant combiner différents types de techniques pour faciliter l'immersion des apprenants tout en permettant la répétition de gestes invasifs (intubation trachéale).

1.4 Le centre de simulation de l'université de Lille - PRESAGE

La faculté de médecine de l'université de Lille a inauguré en 2013 une plateforme de simulation en santé dénommée PRÉSAGE (Plateforme de Recherche et d'Enseignement par la Simulation pour l'Apprentissage des Attitudes et des Gestes). Cette plateforme, qui

reconstitue les conditions réelles du monde hospitalier, a pour objectif de former les professionnels de santé tout au long de leur parcours professionnel par des mises en situation réalistes. PRESAGE propose également un axe de recherche en pédagogie autour de ces thématiques et le développement de matériels pédagogiques innovants : mannequins, simulateurs, scénarios cliniques ou de situations critiques, jeux de rôles, etc. Le centre de simulation en santé PRESAGE accueille chaque année plus de 4.600 apprenants, et en particulier les étudiants en médecine de l'université de Lille à tous les cycles de leur apprentissage.

1.5 Recherche en simulation en santé

Le développement de la simulation médicale s'est fait concomitamment une croissance exponentielle du nombre de publication dans le domaine, comme en témoigne une recherche sur la plateforme Pubmed avec les termes : « medical simulation » « medical simulation training » « simulation in health care » ouvrant sur 17 466 occurrences en mars 2022 (**Figure 4**).

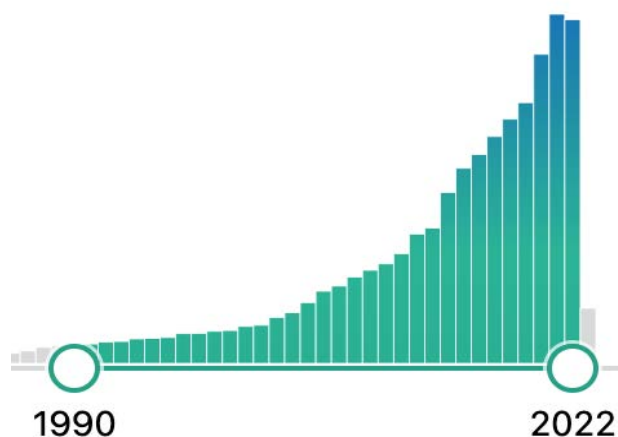


Figure 4 - Évolution exponentielle de la recherche dans le domaine de la simulation médicale - Recherche Pubmed avec les termes "medical simulation" "simulation in health care" "medical simulation training »

La simulation médicale convoque des domaines aux fondements épistémologiques variés parfois difficiles à faire dialoguer [16]. L'extension du domaine des neurosciences aux sciences de l'éducation s'est faite autour des neurosciences cognitives, domaines qui explorent les mécanismes intra-individuels responsables des « déterminants cognitifs, contextuels, affectifs et motivationnel du comportement » [17]. De même, les évolutions technologiques dans le domaine des sciences affectives et de l'intelligence artificielle, questionnent les savoirs et les apprentissages. Au même titre que l'émergence de la calculette dans les années 1970 et l'enseignement des mathématiques (18), l'utilisation des outils issus du machine Learning doit se questionner et s'évaluer, pour ne pas tomber dans une approche manichéenne entre « neuroscepticisme et neuroenthousiasme » [18].

Afin d'appréhender les différentes perspectives ouvertes par l'apprentissage automatique dans le domaine de l'enseignement, une revue des différents concepts est faite. Les bases des principes d'apprentissage automatique ainsi que leurs applications dans le domaine des sciences affectives sont également présentées.

2. Algorithmes et apprentissage automatique

2.1 Informatique et apprentissage automatique

2.1.1 De la Naissance de l'informatique moderne, à l'intelligence artificielle

Selon le dictionnaire de l'académie Française, l'informatique se définit comme la « science du traitement rationnel et automatique de l'information » [19]. Sa naissance s'inscrit dans le

développement des savoirs scientifiques et techniques de la seconde partie du XXe siècle, à la croisée des avancées sur les théories de la calculabilité et les algorithmes, et des évolutions techniques concomitantes à la seconde guerre mondiale et des modèles théoriques de compréhension du fonctionnement cognitif humain.

2.1.2 Les algorithmes et la programmation

Les bases de l'informatique moderne sont posées à la suite des travaux du mathématicien anglais Alan Turing et de son article princeps en 1936 [20]. On parle de thèse de Church-Turing, autour de la notion de calculabilité : elle décrit que tout calcul formel peut se résoudre à l'aide d'une machine. Alan Turing pose également les bases de l'ordinateur moderne autour de la notion de théorie de « machine de Turing », objet mathématique capable de lire une séquence de symbole et d'appliquer des fonctions de transferts.

Par algorithme, on entend une suite finie et non ambiguë d'instructions et d'opérations permettant de résoudre une classe de problèmes. Le mot algorithme provient de la version latinisée du nom du mathématicien persan Al-Khwarizmi [21]. L'histoire des algorithmes remonte à plus de 2000 ans : les premières descriptions sont retrouvées en mésopotamie autour de séquence pour résoudre des additions et des divisions de surfaces agricoles [22]. De manière vulgarisée, une recette de cuisine peut être considérée comme un algorithme, au titre des entrées (les ingrédients), des étapes successives de transformations (découpe, cuisson, etc.) et la résolution du problème (le plat final).

2.1.3 Des sciences cognitives à l'intelligence artificielle

Au croisement de l'informatique, des neurosciences, de la linguistique, de la psychologie, les sciences cognitives sont intrinsèquement liées au développement de l'intelligence artificielle, en participant à la « révolution cognitiviste » de la seconde moitié du XXe siècle [23]. Les sciences cognitives sont un programme multidisciplinaire né dans les années 1950 avec pour objet de décrire, expliquer et le cas échéant de simuler les capacités de l'esprit humain - langage, raisonnement, perception, coordination motrice, planification, décision, émotion, conscience [24]. Le cerveau est alors pensé à l'aide de l'analogie de l'ordinateur, comme une machine à calculer et le monde comme une série d'information à traiter.

Le terme Intelligence artificielle (IA) a été inventé par John McCarthy en 1956 aux États-Unis. L'IA regroupe des définitions multiples et équivoques [21]. Elle peut être définie comme un domaine qui combine l'informatique et des ensembles de données pour permettre la résolution de problèmes.

L'apprentissage en profondeur et l'apprentissage automatique en sont deux sous domaines de l'IA (**figure 5**) et correspondent à des architectures informatiques différentes. L'apprentissage automatique, « machine Learning » en anglais, est un sous domaine de l'IA dans lequel un algorithme peut apprendre à partir de données précédemment collectées. Le deep learning (DL), ou apprentissage profond, est lui-même une branche du machine learning (ML), utilisant des réseaux de neurones artificiels (RNA).

Ces algorithmes sont classiquement utilisés afin de résoudre des tâches dites de classification (ex. : détection des états de stress versus non-stress) ainsi que des tâches de prédiction, dite de « régression ».

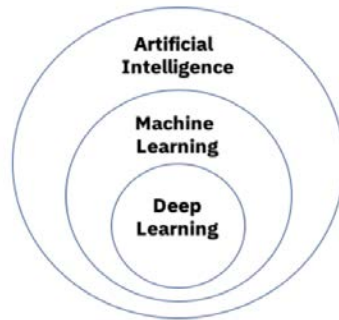


Figure 5 Imbrication des différents champs en intelligence artificielle

2.2 Les bases de l'apprentissage automatique

2.2.1 Le neurone comme modèle de base

En 1949, Donald Hebb psychologue et neurophysiologiste canadien formalise d'un point de vue mathématique les règles d'apprentissage propres aux ensembles de neurones biologiques. La loi dite de Hebb postule que si deux neurones se trouvent en activité au même moment et de manière répétée, leur connexion sera renforcée (via des modifications synaptiques), et l'activation de l'un par l'autre sera par la suite facilitée.

Cette conception de l'apprentissage comme une modification des « poids » synaptiques entre les neurones par l'activation d'un ensemble de neurone concomitant posera les bases des algorithmes d'apprentissage automatique : la notion d'information est alors non pas, dans le neurone, mais dans la relation et l'architecture des synapses.

2.2.2 Le neurone formel ou artificiel

A partir de cette notion d'apprentissage des neurones biologiques, l'émergence de la notion de neurone artificiel (ou formel) sera un deuxième jalon de l'histoire de l'apprentissage automatique.

En 1943, Mcculloth et Pith publient un ouvrage « A Logical Calculus of the Ideas Immanent in Neurons Activity » [25] permettant de formaliser le fonctionnement d'un neurone. Ils décrivent la notion de neurone formel, objet mathématique « simulant » le fonctionnement d'un neurone.

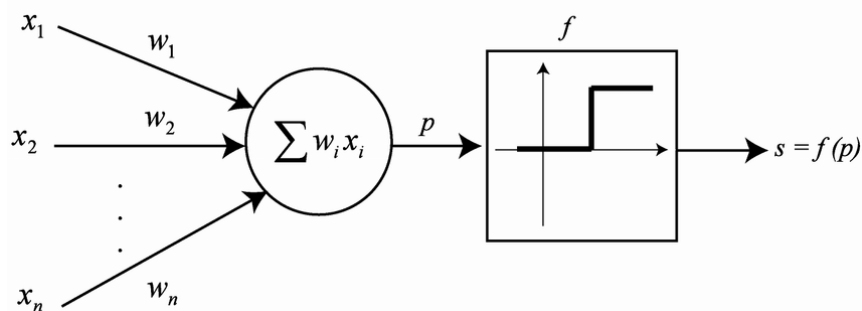


Figure 6 Neurone formel

A partir de la somme des entrées x_i , pondérées par leurs poids « synaptique » w_i , une fonction de transfert est appliquée pour obtenir un résultat (**figure 6**). Dans notre exemple, il s'agit d'une fonction de transfert de type binaire dans laquelle la réponse correspond à 0 et 1 au-delà d'un certain seuil. Cette fonction binaire présente des analogies à avec le Potentiel d'Action Post synaptique et le seuil d'excitabilité des neurones biologiques [26].

2.2.3 Les réseaux de neurones

Les réseaux de neurones sont composés de plusieurs couches de neurones artificiels, avec une couche d'entrée (input layer), une ou plusieurs couches cachées (hidden layer), et d'une couche de sortie (outlayer). Le terme de profondeur du « deep learning » est relié à cette présence de couches de neurone (**Figure 7**). L'ensemble des neurones des couches sont reliés entre eux par des poids et un seuil associé. Ce type d'architecture a été historiquement médiatisé par AlphaGo en 2017, le programme ayant battu le meilleur joueur du monde de l'époque au Go [27], et plus récemment par le programme ChatGPT dans le domaine du Natural language Processing (NLP).

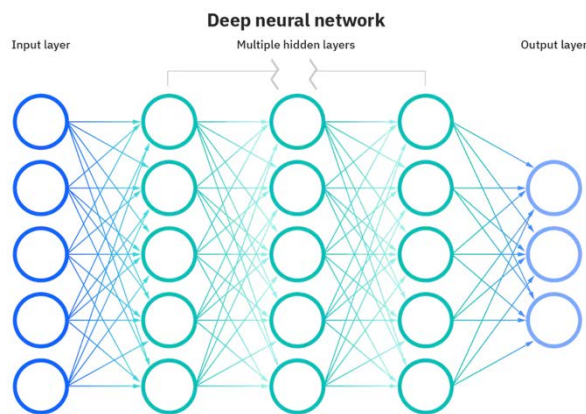


Figure 7 Réseaux de neurones artificiels

L'apprentissage des algorithmes

Il existe différents types d'apprentissages schématiquement rassemblés en trois grandes familles :

- 1) Dans l'apprentissage supervisé, l'algorithme apprend à partir de données préalablement labellisées par un intervenant humain ;
- 2) L'apprentissage non supervisé identifie des similitudes entre des données qui n'ont pas été annotées, afin de les diviser en différents clusters par exemple ;

3) Enfin on parle d'apprentissage par renforcement lorsque l'apprentissage repose sur la maximisation d'une récompense qui lui est donnée lors de l'entraînement [28].

De manière plus précise et spécifique, dans le domaine des réseaux de neurones, la notion d'apprentissage s'appuie sur la notion de « fonction de cout ». Elle correspond à la différence entre les résultats obtenus et les résultats attendus. L'apprentissage se fait par itération (le terme informatique pour définir un cycle) successive. À chaque cycle d'apprentissage, les poids synaptiques sont modifiés par rétro-propagation de l'erreur pour converger vers le minimum de cette fonction. On parle de méthode de descente de gradient (**figure 8**).

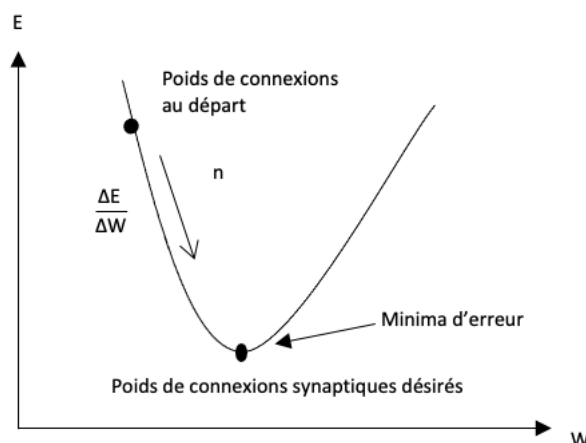


Figure 8 Fonction d'erreur et recherche d'un minimum local. W poids synaptique. E

Fonction d'erreur. D'après © Mermillod

2.3 Informatique affective et détection du système de stress

Bien que le stress ne soit pas stricto sensu une émotion, sa détection est largement intégrée dans le domaine de la reconnaissance affective par ordinateur [29], domaine en pleine expansion et rattaché aux sciences affectives [30]. La détection du système de stress a fait

l'objet de plusieurs revues systématiques de la littérature récente notamment du fait de la généralisation des dispositifs de mesure portatifs non invasifs [29,31,32].

La recherche en sciences affectives se distingue par deux contextes de recherche différents : les études expérimentales permettant de contrôler les stimuli et les études en milieu naturel basées généralement sur un monitoring en temps réel de l'état affectif via des labels.

Dans le domaine expérimental, une distinction est classiquement faite entre plusieurs types de facteurs de activant le système de stress [29] :

- Les facteurs de stress socio-évaluatifs : une tâche créant une situation socialement pertinente pour le sujet. Par exemple, l'exécution d'une tâche devant un jury qui évalue le sujet.
- Les facteurs de stress cognitifs : une tâche exigeant un engagement mental et une attention importante. Par exemple, l'exécution d'une tâche arithmétique (difficile) sous la pression du temps.
- Les facteurs de stress physiques : une tâche créant une situation physiquement inconfortable. Par exemple, être exposé à une chaleur ou un froid extrême.

L'enregistrement des données dans un contexte naturel en temps réel (telle qu'une situation d'apprentissage), la suppression des artefacts et du bruit, et la certitude de l'exactitude des données représentent des défis importants pour les modèles de détection du système de stress [33] [30].

La détection du stress par les algorithmes d'apprentissage automatique s'appuie sur les patterns comportementaux et physiologiques propres à l'activation du système de stress. Après une présentation des concepts historiques à la notion de « stress » nous présenterons les principaux systèmes physiologiques et perceptifs impliqués dans son activation. Nous

nous intéresserons également à l'impact du système de stress dans les phénomènes d'apprentissages.

3 Le système de stress

3.1 Aux origines du concept

Depuis son introduction en biologie par Walter Cannon en 1932, le concept de stress est largement utilisé dans de nombreux domaines de recherches. Initialement utilisé dans le domaine de la physique, il désigne alors la contrainte exercée sur un matériau. Dans le domaine de la biologie, le terme stress a été généralisé à la suite des travaux de Hans Selye en 1936[34]. Selye définit le stress comme la « réponse de l'organisme à toute sollicitation qui lui est faite ». Il participe à la généralisation de ce concept dans la littérature scientifique par cette définition large et permissive. Le terme « stress » désigne alors la conséquence sur l'organisme d'une réponse biologique non spécifique indépendamment de l'agent causal, qu'il nomme le « syndrome général d'adaptation ». Il décrit ce syndrome réactionnel endocrinien avec trois phases : (i) une réaction d'alarme, avec congestion des surrénales, rétrécissement du thymus et des ganglions lymphatiques, ulcères de l'estomac (ii) puis, si la demande continue, une phase adaptative de résistance avec augmentation de la sécrétion de granules dans le cortex surrénalien, hémodilution, hyperchlorémie, anabolisme, etc, (iii) puis, si la demande continue, l'épuisement.

Cette conception de non-spécificité du syndrome et d'un enchaînement linéaire vers un état pathologique a été, dès son origine, critiquée [35]. De nouveaux concepts ont été développés pour rendre compte de la complexité de la notion de stress.

3.2 Eustress, distress, et charge allostatique

Un certain nombre d'auteurs [36,37] ont remis en cause la définition générique de Selye. L'évolution des connaissances dans le système de stress et les controverses associées ont amené à spécifier différents processus. En 1975, Selye propose lui-même l'utilisation des concepts d'eustress, et de distress [38] pour distinguer les effets positifs d'adaptation à un stimulus, à ceux d'un effet négatif lié aux effets à une possible exposition excessive. Ce phénomène dose-dépendant biphasique du stress a été défini en biologie sous le terme « hormèse »[39].

Sterling et Eyer [40] ont introduit le terme d'allostasis autour de la notion de "stabilité par le changement". Il s'agit de la stabilité de l'organisme autour d'une gamme de variables physiologiques, elle-même dynamique et fonction des paramètres environnementaux (le nyctémère, l'activité sportive, etc.), des facteurs génétiques et épigénétiques, et des expériences antérieures.

Enfin des auteurs comme MacEwen [41] ont introduit la notion de charge allostatique comme le « coût de l'exposition chronique à une réponse neuronale ou neuroendocrinienne fluctuante ou exacerbée résultant d'un défi environnemental répété ou chronique ». La charge allostatique à long terme fournit une base conceptuelle pour l'étude des conséquences à long terme du stress sur la santé [42].

Dans notre travail, nous définissons le terme le « système de stress » comme le processus complexe comprenant la réponse psychobiologique à un stimulus perçu comme imprévisible et incontrôlable[43]. Cette réponse comprenant une partie spécifique et non spécifique, dépendante, entre autres, du défi particulier à l'homéostasie, de la perception de l'organisme du facteur de stress et de la capacité perçue à y faire face [44].

3.3 Mécanismes du système de stress

3.3.1 Dimension biologique

Bien que le système de stress soit constitué d'une cascade de réponse à une échelle biologique, cellulaire, physiologique et comportementale dont les interactions forment une complexité non encore complètement élucidée [45] il est classiquement admis que l'axe hypothalamo-hypophysio-surrénalien (HPA) et le système sympathique adrénomédullaire (SAM) sont les deux acteurs clés de la réponse au stress [43].

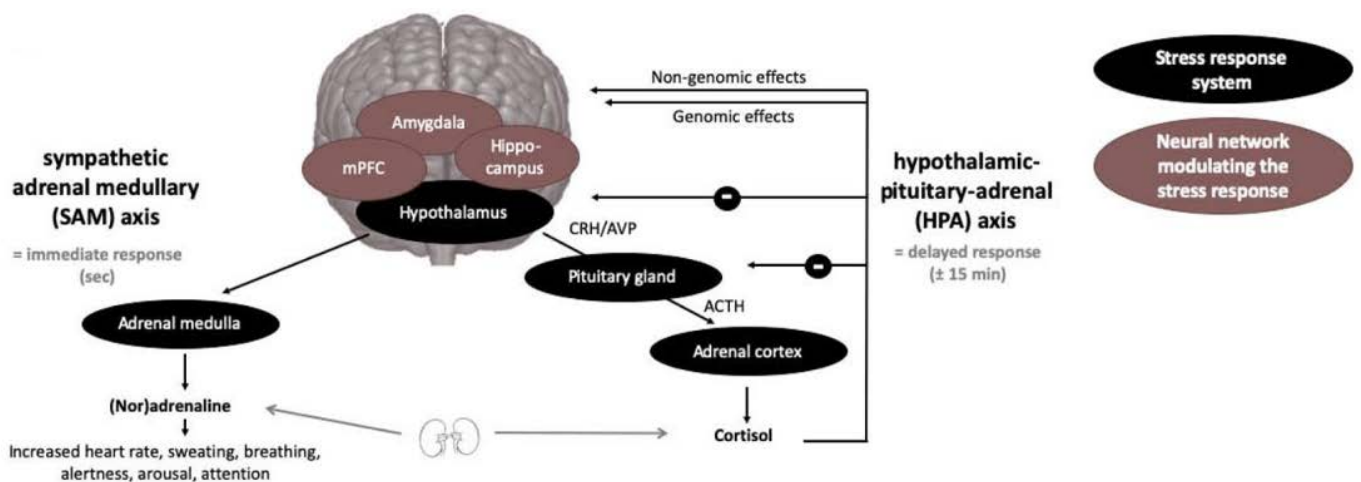


Figure 9 - D'après *The interaction between stress and chronic pain through the lens of threat learning* [45]

Ces deux systèmes correspondent à des cinétiques de réponses différentes (**Figure 9**)[46]. La réponse rapide et immédiate est médiée par le système nerveux autonome via l'action de neurotransmetteur issues de la médullo-surrénale (les catécholamines comprenant l'adrénaline et la noradrénaline). Les principaux effets de ces catécholamines sont une augmentation du rythme cardiaque, de la pression artérielle et du rythme respiratoire, une vasoconstriction des petits vaisseaux sanguins favorisant un afflux de sang aux organes

importants, une hausse de la glycémie et de la consommation d'oxygène par le cerveau et les muscles, un ralentissement de la digestion et la dilatation des pupilles.

En parallèle et dans un délai d'action de l'ordre de la minute le cerveau active l'axe HPA qui entraîne la libération de glucocorticoïdes surrénaliens. La stimulation de ces neurones au cours du stress entraîne la libération de CRH (corticotropin releasing hormone) dans la circulation porte hypophysaire à partir de l'hypothalamus. L'ACTH agit à son tour sur les cellules de la glande corticosurrénale qui libèrent le cortisol dont l'élévation freine le système par rétrocontrôle négatif à plusieurs niveaux (hypophyse, hypothalamus, hippocampe).

Stress aigu versus stress chronique

L'activation aigu du système de stress face à un événement entraîne un retour rapide à l'homéostasie. La persistance de l'activation du système de stress, par défaut de désactivation ou par suractivation, provoque une dysrégulation des systèmes biologiques. On parle de stress chronique par opposition au stress aigu. Les cascades moléculaires sont alors modifiées, par l'intensité des médiateurs et par rapport au délai de rétablissement à l'état basal.

3.3.2 Dimension perceptive

La réponse biologique est caractérisée par une grande variabilité interindividuelle [46], du fait notamment d'un traitement perceptif de la situation stressante. Une perception sous-tend deux modes de traitement de l'information : un processus ascendant dit « bottom-up », ou dirigé par les entrées sensorielles, et un traitement descendant (dit « top-down ») modulé notamment par des processus endogènes tel que la motivation, les expériences de

l'apprenant etc. La variabilité interindividuelle dans le traitement perceptif des situations stressantes a été formalisée par Lazarus et Folkman en 1974 autour du modèle dit transactionnel du stress. Selon ces auteurs, le stress est une « transaction particulière entre un individu et une situation dans laquelle celle-ci est évaluée comme débordant ses ressources et pouvant mettre en danger son bien-être » [47].

Ce processus de « transaction » est le résultant d'un processus cognitif continu par lequel le sujet évalue la situation stressante (évaluation primaire) et ses ressources pour y faire face (évaluation secondaire). Ainsi une même situation de simulation peut être évaluée comme une menace ou un défi par un apprenant, et dépasser ou non ses ressources en fonction de son niveau de connaissance théorique du sujet ou ses expériences antérieures.

De plus, les phénomènes d'apprentissage modulent le traitement perceptif de la situation stressante. Les travaux en biologie autour du conditionnement à la peur ont pu mettre en évidence certains mécanismes neuronaux sous-jacents dans l'apprentissage tels que l'acquisition, la consolidation, et l'extinction des souvenirs émotionnels [48].

3.3.4 Dimension émotionnelle

La réponse au stress est intimement liée à l'état émotionnel des apprenants. Certains auteurs définissent la réponse au stress comme « l'ensemble des changements physiques et émotionnels que le corps humain effectue en réponse à une menace ou à un stress » [42].

Le vécu de menace et de peur est historiquement associé à la définition de la réponse au stress. Il serait l'état émotionnel associé à la réponse au stress. Les travaux en imagerie sur l'implication du complexe amygdalien impliqué dans l'émotion de peur et dans la réponse au stress sont venus renforcer cette association [46].

Dans le domaine des sciences affectives, la formalisation de la notion d'émotion est largement débattue. Historiquement Ekman en 1992 propose une approche discrète des émotions caractérisées par des patterns d'activation notamment faciale et un vécu phénoménologique associé. Il décrit alors six émotions discrètes « les émotions de bases » [49]. D'autres auteurs se sont intéressés à caractérisés les émotions dans un approche dimensionnelle autour du vécu subjectif des personnes [50]. Ainsi selon le modèle circumplex de l'affect, l'émotion est définie en termes d'éveil et de valence, l'activation (Arousal) faisant référence au niveau d'intensité interne de la personne et la valence au caractère agréable ou désagréable de l'émotion. Dans notre travail de recherche, nous considérons l'activation du système de stress comme un état émotionnel non spécifique caractérisé par une valence négative et une intensité élevée conformément à une approche dimensionnelle des émotions [51].

1.3.3.3 Dimension motrice et comportementale

Sur le plan comportemental, le système de stress est classiquement décrit comme une réponse adaptative à l'environnement autour des réactions d'alerte, de fuite ou de combat décrite par Walter Cannon [52], ou d'inhibition de l'action décrite par Henry Laborit [53], un des fondateurs de la psychiatrie moderne.

Bien que la dimension motrice ne puisse pas permettre d'inférer à elle seule l'état subjectif d'une personne, les approches multimodales intégrant des indices externes peuvent augmenter la précision de la reconnaissance affective [54]. Les nouvelles méthodes de vision par ordinateur utilisent traitement des images et l'intelligence artificielle pour répondre à certaines problématiques notamment de classification. Ainsi la motricité des membres, à

l'image des gestes automatiques, conscients ou non, sont corrélés à l'état de stress [55]. Les caractéristiques acoustiques de la parole peuvent également être intégrées pour inférer des états affectifs [55] au même titre que la motricité du visage [56].

3.4 Le système de stress et la simulation en santé

Sur le plan pédagogique, une des difficultés majeures de la prise en compte du système de stress repose sur la complexité des différents domaines mis en jeu et leurs interactions.

Au niveau de l'apprentissage, une littérature scientifique rapporte des effets facilitateurs sur les apprentissages, à l'image d'une meilleure mémorisation des informations pertinentes via

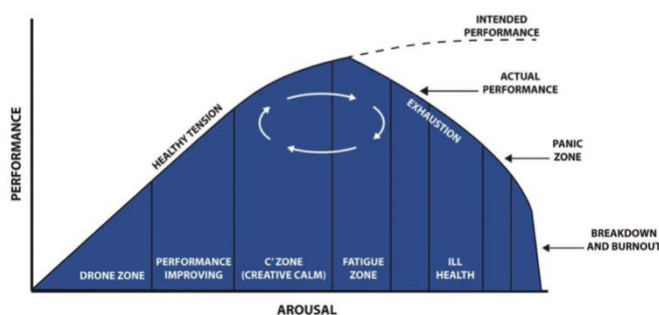


Figure 10 - Corrélation entre le niveau d'éveil et la performance. (d'après Yerkes & Dodson)

l'action des glucocorticoïdes [57], au même titre que des effets perturbateurs notamment en lien avec l'exposition chronique du stress. Le système de stress pourrait induire un effet excitateur sur les performances à faible dose, et un effet inhibiteur à forte dose (**figure 10**). Cette hypothèse est décrite en psychologie comme la loi de « Yerkes et Dodson ». On parle de courbe en U inversée ou de courbe en cloche. Pour certains auteurs, ce phénomène psychologique s'appuierait sur le processus biologique d'hormèse[39].

De même l'implication émotionnelle, le stress, et la capacité d'attention des apprenants sont étroitement corrélés à leur capacité d'apprentissage à court, moyen et long terme. La flexibilité cognitive serait altérée par le système de stress [58].

Ainsi la prise en compte de l'action du système de stress est un des éléments importants de l'apprenant en simulation afin de se connaître en situation professionnelle ou pédagogique et développer des connaissances de soi. Savoir parler de son stress, identifier ses modalités de réponses comportementales, mettre en place des techniques de gestion adaptées pour abaisser le niveau de tension sont des compétences utiles au quotidien.

Le projet ASH – Adaptive Simulation in Healthcare

1 Description

Le Projet Adaptive Simulation In Healthcare (ASH) consiste à développer de nouveaux outils d'analyse des comportements et des émotions ressenties au cours des mises en situation et du débriefing, en particulier le stress des apprenants, en vue d'adapter les séances de simulation et les programmes de formation aux apprenants.

Il s'inscrit dans une collaboration entre le centre PRESAGE, la faculté de Médecine de Lille, le laboratoire CRISTAL (Centre de Recherche en Informatique, Signal et Automatique de Lille) et le laboratoire SCALab (Sciences Cognitives et Sciences Affectives) de Lille. Il est financé dans le cadre l'I-SITE (appel à projet Innovation Pédagogique) Université Lille Nord Europe.

Ce travail de thèse a fait également l'objet d'un financement par l'université et le CHU de Lille dans le cadre d'une année recherche sur l'année universitaire 2021-2022. Il a été l'occasion de soutenir le master 2 de recherche de Science Cognitive parcours cognition naturelle et artificielle, co-porté par Grenoble INP et l'université Grenoble Alpes. Les travaux présentés ci-dessous ont fait l'objet de discussion multidisciplinaire régulière dans le cadre d'un d'un groupe de recherche sur le comportement en situation simulée porté par l'UFR3S et présidé par le Pr. Lebuffes.

2 Objectifs du travail de thèse

2.1 Objectifs principaux et secondaires

Dans ce travail de thèse, nous abordons la place de la détection du système de stress par des outils de machine Learning dans le processus de simulation médicale.

Le projet s'est déroulé selon un certain nombre d'étapes et d'objectifs successifs :

L'objectif principal de notre projet consiste à développer un outil de détection du stress des apprenants au cours des mises en situation, en vue d'améliorer le débriefing des simulations.

Le premier objectif secondaire correspond au test d'une interface graphique, synchronisant les signaux physiologiques, les périodes classifiées comme stress et la vidéo de la simulation.

Le deuxième objectif secondaire est d'évaluer la pertinence pédagogique de l'interface en condition réelle.

A partir de cette expérimentation, les implications et les limites de notre outil sont discutées sur le plan technique, pédagogique et éthique.

2.2 Type d'étude

Il s'agit d'une étude exploratoire prospective monocentrique pseudo-randomisée qui porte sur l'évaluation des pratiques d'enseignement dans le domaine de la santé.

Méthode et étapes du projet

1 Protocole expérimental

Le projet s'est déroulé en plusieurs étapes comprenant :

- 1) Une phase de codage d'un algorithme de détection du stress,
- 2) Une phase de test de cet algorithme et de recueil de la vérité terrain
- 3) Une phase de construction d'une interface graphique
- 4) Un test en condition réelle et étude de faisabilité.

1.1 Codage de l'algorithme

L'ensemble du développement de la méthode de détection du stress et le codage de l'algorithme a fait l'objet d'une collaboration sur les aspects informatiques avec le laboratoire CRISTAL de l'université de Lille. Cette collaboration s'inscrit dans le cadre du projet de thèse de Yujin Wu, doctorante en informatique.

À partir d'un cadre géométrique permettant une intégration des signaux multimodaux, un modèle de classification a été implémenté à partir de Pytorch en utilisant un algorithme de réseaux de neurones de type LSTM (Long Short Term Memory). Ces réseaux permettent d'encoder des séquences temporelles et capturer des variations non linéaires et complexes.

L'entraînement a utilisé la banque de données publique WESAD [59]. Dans un environnement de laboratoire contrôlé, des données multimodales constituées de signaux

de mouvement (ACC), et de signaux physiologiques (ECG, EDA, FR, TEMP, EMG, BVP) provenant de 15 sujets ont été capturées par deux dispositifs portables, un capteur de poignet et un capteur de poitrine. Trois états affectifs (Amusement, stress, neutre) ont été enregistrés. La condition stress était produite d'un test de stress social de Trier (TSST) [60].

1.2 Vérification de la vérité de terrain

L'utilisation d'algorithmes de machine learning nécessite le recueil d'une vérité de terrain la plus fiable possible [29]. Pour ce faire une méthode d'évaluation écologique momentanée (EMA – Ecological momentary assessment) a été adaptée pour respecter le cadre des simulations. À partir d'une échelle comprenant la valence et l'intensité des affectifs, les participants ont été invités à évaluer et annoter à posteriori les vidéos des simulations. De plus, afin de contrôler la validité d'une de simulation comme un facteur de stress, une série de questionnaires pré-post simulation ont été utilisées, conformément à la littérature scientifique.

La phase de recueil de la vérité terrain a fait l'objet de deux sessions différentes. L'une en décembre 2020 afin de construire l'algorithme et l'autre en juin 2022 lors du test en condition réelle pour continuer à contrôler et comparer les prédictions de l'algorithme aux vécus subjectifs des apprenants.

1.3 Développement de l'interface graphique

L'interface graphique a été développée à partir de PyQt sous le langage Python, permettant de charger, synchroniser et visualiser les informations vidéo de l'apprenant et les enregistrements des signaux physiologiques collectés dans le centre de formation PRESAGE. La méthode proposée a également été implémentée dans cette interface pour détecter les états de stress de l'apprenant pendant le processus de formation.

1.4 Test de l'interface graphique et faisabilité

Enfin l'ensemble de la méthode a été testé en condition réelle lors d'une session de simulation spécifiquement organisée en juin 2022.

2 Participants et scénarii

Les données ont été recueillies lors des sessions de simulation sur le centre PRESAGE sur les années universitaires 2020-2022 auprès d'étudiants en première année d'internat de psychiatrie et d'étudiant en deuxième cycle des études de santé. Les étudiants étaient tous inscrits à l'université de Lille et n'avaient jamais participé aux sessions de simulation.

Session de décembre 2020 :

Dans le cadre des cours obligatoires de 1^{re} année d'internat, 4 groupes de 12 internes ont participé à deux scénarii : une évaluation d'un risque suicidaire et la gestion d'une agitation aux urgences.

Sur le scénario d'agitation : 12 apprenants se sont portés volontaires pour participer aux simulations. Les autres étudiants étaient observateurs dans une salle spécifiquement dédiée comprenant la retransmission des simulations.

Sur le scénario évaluation du risque suicidaire, un étudiant se portait volontaire dans chaque sous-groupe pour participer à la simulation. 4 enregistrements de données ont donc été faits. Les acteurs étaient professionnels, avec rémunération dans le cadre de financement universitaire.

Session de juin 2022 :

Le test de l'interface s'est fait en juin 2022 auprès de 5 étudiants recrutés au volontariat en 2e cycle des études de santé. Ceux-ci ont été convoqués sur un créneau de simulation individuel le matin afin de garantir une participation active de l'ensemble des 5 apprenants. Chaque participant était invité à visionner la vidéo de sa simulation et à étiqueter les séquences saillantes sur le plan émotionnel à l'aide de la self assesment manikin (SAM) (c.f.§ 3.5) avant la séance de débriefing collectif afin de contrôler la vérité de terrain.

Durant le débriefing, les différentes séquences sont discutées sur le plan du vécu émotionnel, et des difficultés perçues en partant de l'interface graphique.

Le scénario de simulation portait sur une évaluation d'un risque suicidaire chez un patient se présentant aux urgences. Le patient était joué par des internes en fin d'internat.

3 Déroulé des séances de simulation

Chaque session de simulation comprenait 4 séquences : une phase de briefing sur le scénario, la mise en situation avec les étudiants volontaires d'une durée de 10- 15min, une phase d'évaluation et de recueil de la vérité de terrain, et la phase de débriefing.

Briefing

À leur arrivée au Centre PRESAGE, chaque volontaire se voit remettre une lettre d'information et le formulaire du droit à l'image qu'ils signent et rendent à l'ingénieur responsable de la formation.

Lors du briefing, ils reçoivent également un code d'anonymisation (composé d'initiales de la mère, initiales du père, des 3 premières lettres de la ville de naissance, de l'âge et enfin de la lettre F si l'étudiant est de sexe féminin et H pour masculin) et une série d'échelles psychométriques. Les échelles comprennent une Self Assesment Manikin, un questionnaire sur le niveau de stress état (échelle STAI-YA), ainsi qu'une auto-évaluation niveau de compétence perçue et la difficulté de la tâche (échelle de Likert de 1 à 9).

Une fois remplis, l'investigateur donne les explications à propos du scénario, du rôle des apprenants et des différentes mesures : il montre les différentes caméras dans la salle, et présente le bracelet avant sa pose et sa mise en route.

Simulation

La simulation se déroule dans une salle spécifiquement dédiée. À l'entrée dans la salle, les étudiants volontaires déclenchent un marqueur sur le bracelet Empatica en positionnant leurs poignets face à la caméra de plafond et la séance débute. Chaque séance dure environ 15 minutes et se clôture soit par l'étudiant après avoir fait une proposition de prise en charge, soit par le formateur.

Évaluation

À la fin de la séance de simulation, après avoir retiré le bracelet et dans une salle à part, une nouvelle évaluation psychométrique est faite (STAI-YA et SAM, compétences et difficultés perçues). Les participants sont ensuite invités à visionner leur simulation et à annoter la vidéo à l'aide de l'échelle SAM les moments les plus saillants sur le plan émotionnel afin d'établir une vérité de terrain.

Débriefing

Enfin, l'ensemble des participants sont conviés à une séance de débriefing collectif en présence des acteurs et d'un médecin pour faire un retour sur les différentes séquences, évoquer le vécu des apprenants leurs difficultés, et les pistes d'amélioration possible. Le débriefing était mené par un médecin sénior ayant une expérience d'enseignement.

4 Capteurs et signaux

Chaque apprenant en simulation était équipé d'un bracelet E4, un dispositif portable développé par l'entreprise EMPATICA. Le caractère portable et non invasif a permis d'enregistrer les données physiologiques des étudiants pendant les différentes simulations. Les signaux suivants ont été collectés : accéléromètre 3 axes (ACC), pression sanguine volumique (BVP – Blood Volume Pulse), activité électrodermale (AED), intervalle interbattement (IBI), fréquence cardiaque (HR – Heart Rate), température de la peau au niveau du poignet (Temperature - TEMP). Cette recherche se concentre principalement sur les signaux AED, BVP, et TEMP pour explorer la différence dans l'état de stress mental des étudiants avant et pendant la simulation.

4.1 Le signal AED

L'activité électrodermale reflète les changements de conductance de la peau résultant de l'activité des glandes sudoripares [61]. Elle est reliée à l'éveil et a été largement utilisée dans la détection du stress et des émotions [51]. Le signal EDA peut être décomposé en deux composantes de base : tonique et phasique, fournissant respectivement des mesures de l'activation du SNA qui s'habitue lentement et des mesures du SNA moment par moment qui reflète les réponses spécifiques au stimulus [62]. Nous avons ensuite utilisé la méthode cvxEDA proposée par Greco et al. [63] pour décomposer le signal EDA normalisé en ces deux composantes, qui emploie une approche basée sur la déconvolution utilisant l'estimation Maximum a Posteriori (MAP) et l'optimisation convexe, et qui est robuste au bruit.

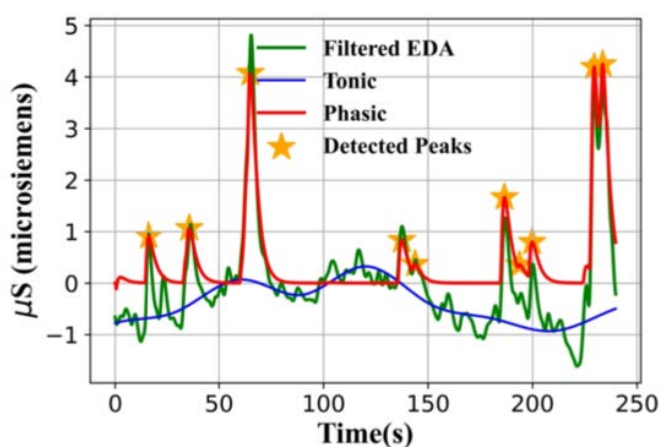


Figure 11 - Décomposition du signal AED normalisé en réponse tonique et phasique et détection des pics

4.2 Le signal BVP

Le signal de pression sanguine volumique (BVP) est la mesure du volume de sang qui passe sur un capteur photopléthysmographique (PPG) à chaque pulsation [64] (**figure 12**). À partir

de ce signal, on peut déduire le signal de l'intervalle inter-battement (IBI), qui est l'intervalle de temps entre deux pics BVP consécutifs. La variabilité de la fréquence cardiaque (VRC), expliquée comme la variabilité de l'IBI, est probablement la caractéristique la plus utilisée dans la détection du stress [51]. Elle est considérée comme un biomarqueur non invasif qui reflète l'activité des composantes sympathiques et vagales du système nerveux autonome, respectivement dans les bandes de puissance des basses (LF) et hautes fréquences (HF) [65].

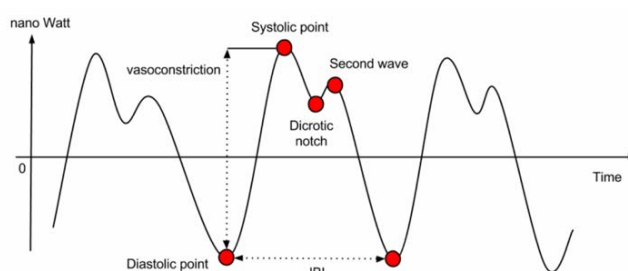


Figure 12 - Points diastoliques : minima locaux du PPG utilisé pour calculer l'IBI - Points systoliques : maxima locaux du PPG pouvant être utilisé en conjonction avec le point diastolique pour estimer la vasoconstriction du sujet

4.3 Température corporelle

Le stress est associé à une augmentation de la température centrale du corps et à une modification de la circulation sanguine périphérique [66]. Au cours d'un stress aigu, l'activation du système nerveux autonome entraîne une vasoconstriction périphérique et provoque une baisse de courte durée de la température de la peau. Ces changements de la température périphérique ont été mesurés au niveau du poignet des participants à l'aide d'une thermopile infrarouge.

4.4 Prétraitements des données

Des filtres Butterworth passe-bas avec des fréquences de coupure de 0,5 Hz, 2 Hz et 5 Hz ont d'abord été utilisés pour filtrer les composantes haute fréquence introduites par les artefacts de mouvement dans les signaux EDA, les signaux BVP et les signaux ACC, respectivement, suivis d'une segmentation sans chevauchement de 60 secondes. Afin d'avoir la même longueur que le signal EDA et le signal TEMP dans ces segments de données, le signal BVP (64Hz) et le signal ACC (32Hz) ont été sous-échantillonnés à 4 Hz.

5 Échelles psychométriques

Afin d'établir une vérité de terrain autour du vécu subjectif des apprenants, un ensemble de questionnaires psychométriques ont été proposés lors des simulations avant et après les scénarios.

5.1 Self Assesment Manikin

Le Mannequin d'auto-évaluation (SAM) [67] est une technique d'évaluation picturale non verbale (**figure 13**) qui mesure directement le plaisir, l'excitation et la dominance associés à la réaction affective d'une personne à une grande variété de stimuli. Il s'agit d'une échelle visuelle largement utilisée dans le domaine science affective de par sa simplicité et ses bonnes qualités psychométriques [68]. Dans notre étude, seule la dimension de plaisir et d'éveil a été mesurée pour ne pas être redondante et induire des biais de mesure.

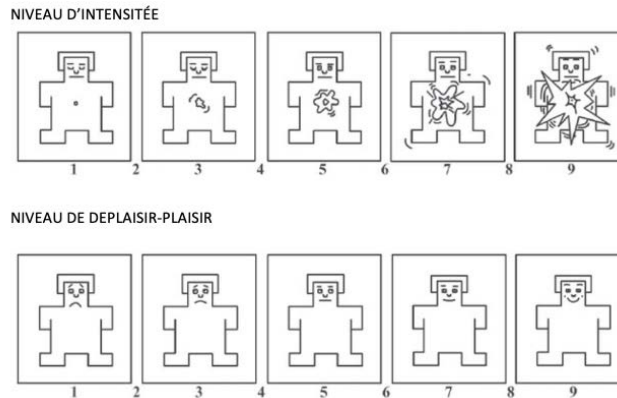


Figure 13 - Échelle d'auto évaluation (Self Assessment Manikin - SAM)

5.2 Inventaire d'anxiété état - STAI -YE

Il s'agit d'un questionnaire évaluant l'état émotionnel lié à une situation particulière (sentiments d'appréhension, de tension, de nervosité et d'inquiétude que le sujet ressent à un moment précis). Il se compose d'une série d'échelles de Likert en 4 points (*non, plutôt non, plutôt oui, oui*), évaluant l'intensité de ce que les sujets ressentent à l'instant présent.

Utilisé dans de nombreuses études dans le domaine de la reconnaissance affective par l'intelligence artificielle [29,69], son résultat est pris en compte comme une approximation de l'état de stress aigu de la personne.

5.3 Échelle de Likert sur le niveau de compétence perçue et la difficulté de la tâche

D'un point de vue transactionnel, le stress peut être considéré comme le résultat d'une interaction entre l'apprenant et son évaluation cognitive, conformément au modèle de Lazarus et Folkman [47].

Ainsi chaque apprenant en simulation et observateur s'est vu proposer de manière répétée une mesure du niveau de compétence perçu pour gérer la simulation (évaluation primaire) et une mesure de sa perception de la difficulté de la tâche (évaluation secondaire). Une échelle de Likert de comprenant 9 items était proposée.

6 Comité éthique

Le projet de recherche a fait l'objet d'une instruction auprès du comité éthique de l'université de Lille (numéro de dossier ASH 2022-626-S108-AR).

Résultats

ÉTAPE 1 : Création de l'algorithme

1.1 Cadre géométrique pour la détection du stress

Fusion des signaux multimodaux et géométrie riemannienne

Pour détecter le stress des apprenants, une approche utilisant des concepts de géométrie Riemannienne a été développée par Y. Wu dans le cadre de son travail de thèse en informatique au sein du laboratoire CRISTAL[70]. Les données du signal multimodal sont d'abord utilisées pour calculer la matrice de covariance S et la matrice de covariance croisée C qui contient les informations de corrélation des signaux entre les différents horodatages. Ces matrices ont des propriétés mathématiques et géométriques : elles sont définies positivement et symétriques (matrices SPD) et se situent sur des manifolds riemanniens. Ensuite, la covariance S et la covariance croisée C , sont ensuite combinées de manière symétrique pour former une nouvelle matrice de bloc qui est considérée comme la représentation multimodale finale des signaux physiologiques. Enfin, une méthode de cartographie de l'espace tangent basée sur la géométrie du manifold riemannien a été adoptée pour convertir ces matrices SPD en séquences de vecteurs dans l'espace euclidien. Ces séquences de vecteur ont été introduites dans les classificateurs pour l'apprentissage. Un résumé de la méthode est présenté dans la figure 14.

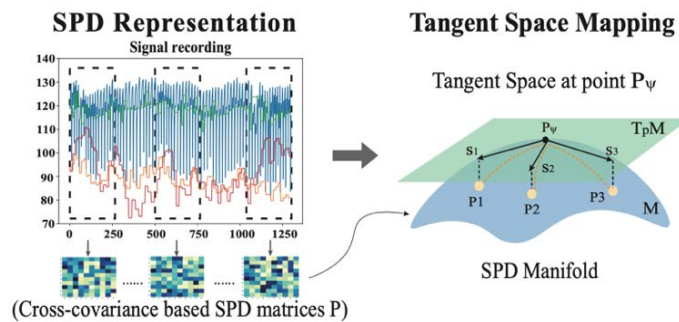


Figure 14 – Cadre géométrique de détection du stress

Classifieur de type Long Short-Term Memory (LSTM)

Un réseau de neurones de type LSTM a été utilisé pour classifier les données physiologiques. Ces réseaux appartiennent à la catégorie des réseaux dits récurrents (RNN). Les réseaux récurrents intègrent comme données d'entrée le signal à l'instant t et le signal à l'instant $t-1$, contrairement à un réseau de neurones classique. Un des principaux avantages de ces réseaux réside dans le traitement des séquences ayant une dimension temporelle. Néanmoins, ils sont particulièrement difficiles à entraîner du fait de notamment des problématiques de disparition de gradient [71]. Les réseaux de type LSTM ont été développés notamment pour améliorer les performances d'apprentissage sur des données comprenant un intervalle de temps important [72]. Pour éviter les effets de surapprentissage («overfitting » en anglais), une opération de dropout a été employée pour éteindre au hasard une partie des réponses des couches de LSTM (**Figure 15**). L'optimiseur de gradient de

descente Adam [73] (pour Adaptive Moment Estimation) avec un taux d'apprentissage à 0,001 a été sélectionné.

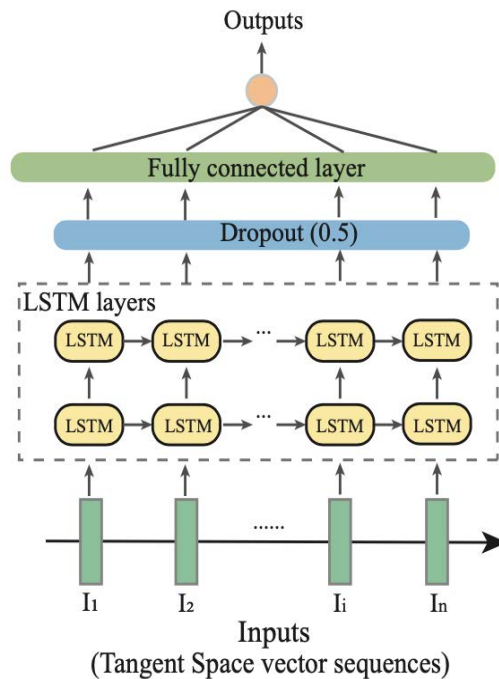


Figure 15 - Architecture du réseau de neurones – Séquence de vecteur en entrée suivant de deux couches de LSTM, connecté à une couche de « dropout », et une couche de sortie connectée

1.2 Données d'entraînement

Le jeu de données WESAD [59] est l'un des jeux de données publics les plus largement utilisés pour la reconnaissance du stress et des affects. Le protocole expérimental a été conçu pour stimuler trois états émotionnels différents (état de base, stress, amusement) chez les participants. Sur la base de travaux antérieurs [59,74], un problème binaire de détection de stress (stress vs non-stress) peut être formulé sur le jeu de données WESAD en fusionnant la classe de base et la classe d'amusement pour former la classe de non-stress.

1.3 Mesure de la performance

Afin de comparer la performance des algorithmes entre eux, un ensemble de métriques a été développé en utilisant des matrices dites de confusions, quantifiant le nombre de prédictions selon quatre modalités.

Confusion matrix		Reality	
		Negative : 0	Positive : 1
Prediction	Negative : 0	True Negative : TN	False Negative : FN
	Positive : 1	False Positive : FP	True Positive : TP

La précision (accuracy) correspond au nombre de positifs bien prédit (Vrai Positif) divisé par l'ensemble des positifs prédit (Vrai Positif + Faux Positif).

$$precision = \frac{Vrai\ Positif}{Vrai\ Positif + Faux\ Positif}$$

Le rappel (recall) au pourcentage de positifs bien prédit par notre modèle.

$$recall = \frac{Vrai\ Positif}{Vrai\ Positif + Faux\ Négatif}$$

Ces deux métriques peuvent être combinées dans le score F1 :

$$F1\text{-score} = \frac{2 \times (precision \times recall)}{(precision + recall)}$$

La méthode proposée est évaluée à l'aide d'une validation croisée avec Leave-One-Subject-Out (LOSO-CV) sur le jeu de données WESAD en utilisant deux métriques : le score F1 et la précision (accuracy). La table I montre des performances de détection de l'état de stress conforme à l'état de l'art dans le domaine tout en permettant d'intégrer un traitement multimodal des signaux.

Modalities Features	Wrist Sensor			
	Physio + Motion		Only Physio	
	Accuracy	F1score	Accuracy	F1score
with S (baseline)	89.23	88.07	90.13	89.73
with C (baseline)	90.91	90.04	88.07	87.28
with P (m = 2)	94.08	93.81	92.15	92.20
with P (m = 3)	93.00	92.38	93.10	92.78
with P (m = 4)	94.65	93.99	93.47	93.25

Table I – Performance de détection du stress sur la base de données WESAD – F1 score et Accuracy – S : matrice de covariance ; C : matrice de covariance croisée ; P : matrice composite comprenant m bloc S et C.

ÉTAPE 2 Contrôle de la vérité de terrain

2.1 Données psychométriques

Afin de contrôler l'effet de la simulation d'un point de vue global sur les apprenants en termes de stress perçus, l'échelle STAI-AE a été proposée avant et après la simulation conformément à nos hypothèses de recherche. Un test non paramétrique de Wilcoxon pour données appariées montrait une différence significative entre les scores pré et post simulation sur le scénario « agitation » en décembre 2020 (P-value= 0.0297713) ainsi qu'une absence de différence significative lors des scénarios « risque suicidaire » de décembre

2020 (P-value = 0.4614) et de juin 2022 (p-value = 0.5838). Les scores aux échelles psychométriques sont présentés figure 16.

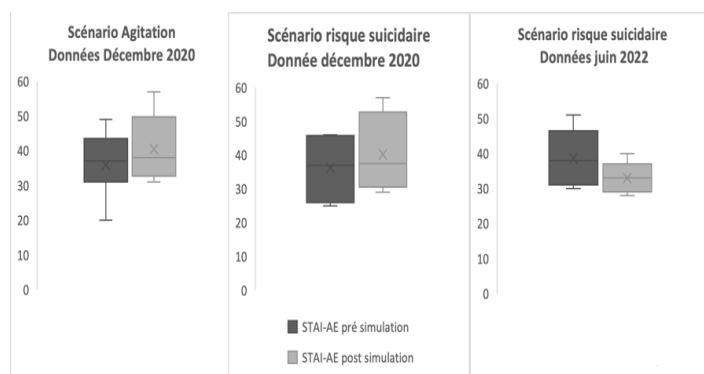


Figure 16 - Anxiété état (STAI-AE) AVANT - APRÈS la simulation lors des différentes sessions

2.2 Étiquette de valence et d'arousal

Lors de la session de décembre 2020, nous avons demandé aux étudiants de fournir un score d'état affectif global à l'issue des simulations. Puis à distance de ces simulations nous avons vérifié de manière empirique les prédictions de l'algorithme sur les différentes vidéos

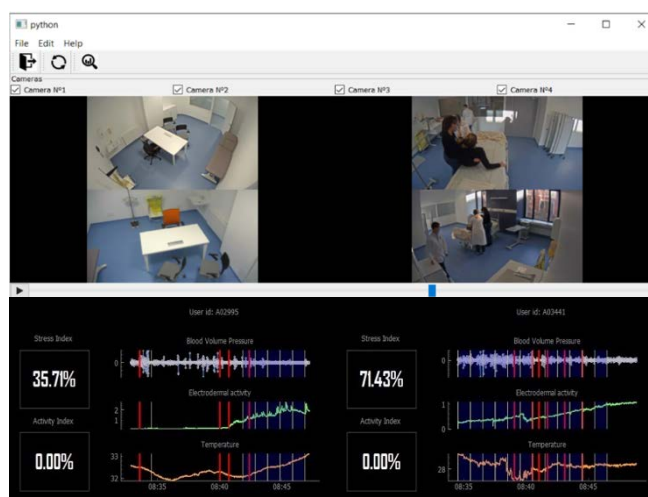


Figure 17 - Présentation de l'interface graphique. En bas à gauche les signaux du 1^{er} apprenant. En bas à droites les signaux du deuxième apprenant. Les barres rouges représentent les étiquettes « stress »

de simulation afin de contrôler leur correspondance avec des évènements possiblement

facteurs de stress. De plus, de manière concomitante au test en condition réelle de l'interface en juin 2022, nous avons à nouveau demandé aux étudiants de revoir la vidéo de la simulation et de marquer les moments de stress. Nous avons obtenu 55 étiquettes à l'aide d'une échelle SAM pour les 5 participants, avec une sélection des étiquettes avec valence basse (c'est-à-dire inférieur, à 5 sur une échelle de 1 à 9) et haute activation (supérieur à 5 sur une échelle de 1 à 9). 33 étiquettes ont été ainsi sélectionnées afin de comparer les marqueurs réels (les lignes verticales rouges) avec les marqueurs prédits (les zones bleues) (figure 17).

Les marqueurs fournis par les étudiants étaient largement proches des moments prédits par le modèle ce qui nous semble cohérent étant donné le décalage entre les réponses physiologiques et la cognition.

ÉTAPE 3 : Création de l'interface graphique

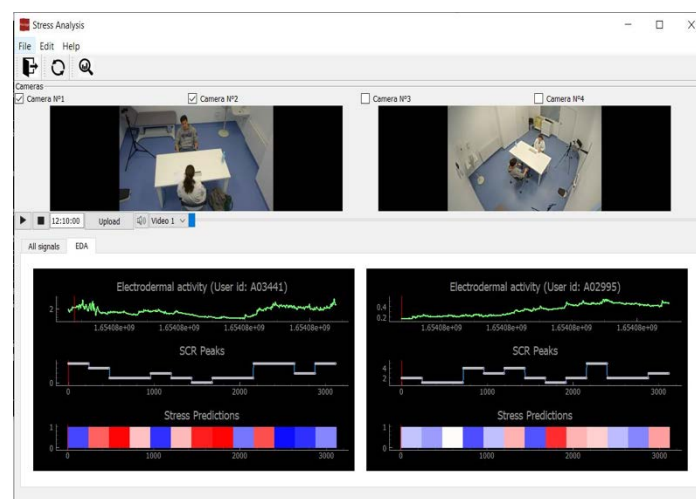


Figure 18 - Présentation de l'interface finale implémenté avec l'algorithme de détection du stress

L'interface graphique se décompose en deux parties (Figure 18) : une partie supérieure permettant de visionner l'enregistrement vidéo de la simulation par les différentes caméras ;

et une partie inférieure comprenant les signaux physiologiques des apprenants sur l'ensemble de la simulation. Les signaux de deux apprenants peuvent être montrés de manière concomitante. Un curseur permet de faire défiler les vidéos tout en gardant la correspondance avec les signaux physiologiques.

Au cours du développement de l'interface, le retour des utilisateurs et des apprenants a permis de proposer plusieurs évolutions de l'outil. Les périodes prédites comme stress étaient initialement présentées en bleu, elle ne permettait pas de discriminer précisément les moments pertinents, un trop grand nombre de séquence de 1 minute étant labellisé comme « stress ». Le développement d'une version présentant la probabilité de l'algorithme à l'aide de la barre de couleur a permis d'être plus spécifique dans l'utilisation de l'interface. Les valeurs de la barre de couleur sont dans l'intervalle de [0,1]. Le gradient de couleur correspond aux séquences de 1 minute étiquetées comme « non-stress » pour le bleu, comme haut degré d'incertitude pour le blanc, et à une forte probabilité d'être classé comme « stress » pour les séquences rouges. La version initiale comprenait la présentation d'un seul apprenant, une version avec plusieurs enregistrements a été développée afin de permettre son utilisation dans des scénarii à plusieurs. Enfin la présentation initiale de l'ensemble des signaux physiologiques a été réduite au seul signal EDA afin de simplifier la lecture de l'interface.

ETAPE 4 : Test de l'interface graphique

L'utilisation de notre méthode en situation réelle en juin 2022 a permis de vérifier la pertinence pédagogique et la faisabilité d'une approche de détection du stress.

Sur le plan de la faisabilité technique, l'utilisation des capteurs portables de type Empatica4 était simple et rapide d'utilisation. Ils nécessitent néanmoins un téléphone portable par bracelet afin d'enregistrer et de synchroniser les données sur une plateforme en ligne. À l'issue de chaque simulation un téléchargement des données, associé à la récupération de la vidéo de la simulation étaient préalables pour analyser et présenter les données dans l'interface.

Sur le plan humain, au regard de la simplicité de notre méthode, aucun technicien supplémentaire n'est nécessaire.

Sur le plan pédagogique :

Afin de contrôler la pertinence de notre scénario risque suicidaire notamment en termes de développement de compétence, un monitoring des variables subjectives durant les différentes séquences de la simulation. Nous avons demandé aux apprenants de monitorer leur perception de la difficulté de la tâche, et du niveau de compétence pour la gérer. Une dimension métacognitive de certitude dans la réponse a également été rajoutée.

Devant la taille de l'échantillon, il n'a pas été réalisé de statistique descriptive. Néanmoins, on peut noter la correspondance entre une potentielle baisse de la difficulté perçue, et une augmentation du sentiment de compétence. Selon le modèle transactionnel du stress de Lazarus et Folkman, cela correspondrait à une diminution du niveau de stress, cohérente avec les données de l'échelle STAI-YE (**figure 19**).

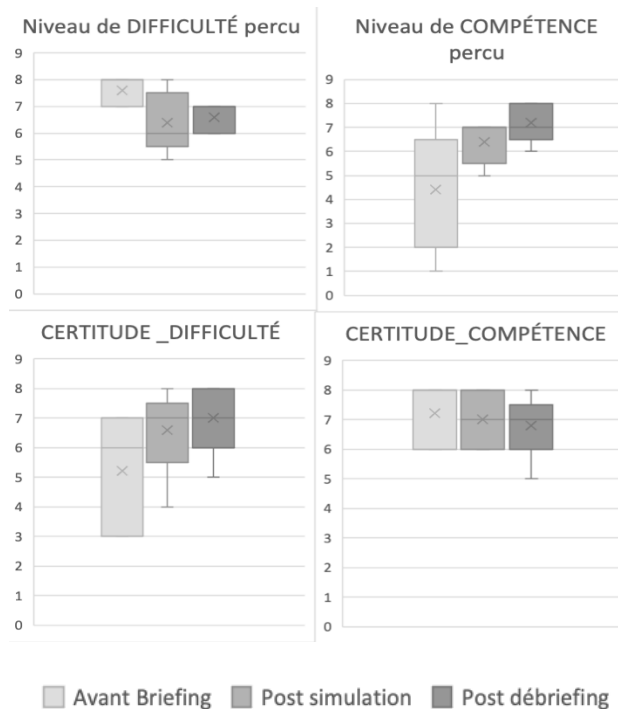
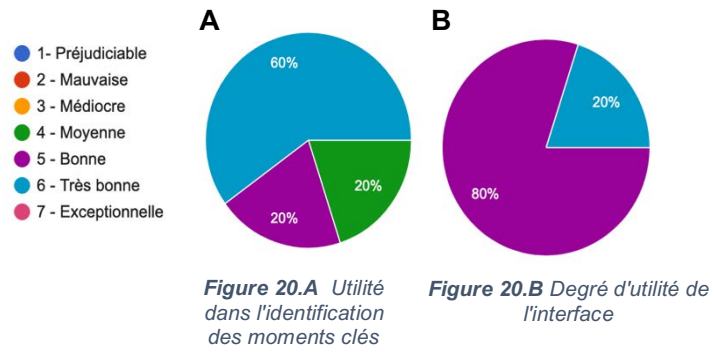


Figure 19 - Monitoring des variables subjectives - Perception de la difficulté - Degré de certitude par rapport à la perception de la difficulté - perception du niveau de compétence - Certitude dans son niveau de compétence

Concernant l'interface graphique :

Les différents retours des apprenants ont été globalement très positifs quant à l'utilité de l'interface dans le débriefing et sa capacité à identifier les moments clés avec un très bon niveau de satisfaction (**Figure 20**). L'utilisation de l'interface a permis de pointer certaines séquences et d'être un support à la verbalisation émotionnelle. De plus, au-delà des questions ouvertes classiques durant le débriefing, l'utilisation de la barre de couleur a permis

de lancer un certain nombre de processus réflexif à partir du matériel vidéo sur les difficultés rencontrées.



Discussion

1 Synthèse des résultats

Notre travail a permis la création d'une méthode de détection du stress multimodale utilisant des capteurs portables non invasifs durant une simulation en santé. En se basant sur un cadre géométrique riemannien, cette approche intègre les informations liées à la co-variance et la cross variance des signaux BVP, AED et TEMP sous forme de matrice SPD. A partir d'une projection dans un espace tangent, ces matrices ont été utilisées comme entrée d'un réseau de neurone récurrent. Une étape de test nous a permis de confirmer que notre méthode est conforme à l'état de l'art en termes de précision et de score F1. Nous avons ensuite développé une interface graphique pour visualiser les vidéos des simulations et les résultats de notre classification. L'ensemble de notre dispositif a fait l'objet d'un test en situation réelle. Il s'agit d'une première preuve de concept de la faisabilité et de l'utilité d'une méthode de détection de stress dans un contexte de simulation en santé.

2 Discussion des résultats

Limites

L'utilisation d'un algorithme de type réseau de neurones profond nécessite un grand nombre de données pour son entraînement. Du fait de l'absence de données suffisantes et fiables, la banque de données WESAD a été utilisée comme jeu de données d'entraînement avec les mesures de performances associées (tableau I). L'utilisation de cet algorithme sur le

centre PRESAGE, malgré la similitude des signaux, entraîne une diminution de la fiabilité et de la précision de notre classification. À terme, une mesure de performance sur des données de PRESAGE devra être créée pour quantifier de manière plus précise notre méthode de classification.

Sur le plan épistémologique, une approche binaire du concept de stress à deux classes (stress versus non-stress) reste questionnable au regard de la complexité des systèmes effecteurs mis en jeu et de la non-linéarité des réponses propres aux systèmes biologiques [39].

Concernant la vérité de terrain, les méthodes classiques d'étude du stress en condition écologique utilisent des « sondes » comprenant des autodéclarations périodiques. Ces méthodes sont contraignantes [75] et peu compatibles avec une simulation en santé. L'obtention de données de qualité avec un étiquetage fiable est un des enjeux majeurs de l'intelligence artificielle dans le domaine de l'apprentissage supervisé. Le recueil a posteriori des simulations à partir des vidéos de simulations est donc un compromis afin de ne pas dénaturer le déroulé des scénarios de simulation. Le décalage entre les étiquettes apportées à posteriori et les séquences classées comme stress (figure 14) semble conforme aux différentes cinétiques des réponses à un stimulus perçu comme stressant [46]. En effet, la cascade physiologique met en jeu des effets synaptiques rapides (liés au monoamines), et des effets de l'ordre de la minute voir à l'heure par les glucocorticoïdes.

Sur le plan des étiquettes, la labellisation comme « stress » sur la base d'une activation supérieur à 5 et d'une valence inférieure à 5 est une approximation. Bien que présente dans la littérature scientifique, le seuil de 5 reste arbitraire. De plus, d'après le modèle de modèle circumplex de l'affect [50], il est décrit une similitude dans l'approche bidimensionnelle des

émotions entre la colère, l'ennui, ou la nervosité, pourtant très distinctes sur le plan phénoménologique.

Concernant le contrôle du niveau de stress à la suite des simulations, l'absence de différence significative sur les scénarios risque suicidaires (**Figure 16**) pourrait être due au manque de puissance statistique entraînée par la faible taille des échantillons. Néanmoins, le retour des étudiants lors de la session de juin 2022 semble tendre pour ce groupe à une diminution du niveau de stress à l'issue de la simulation. Du fait du statut d'externe en médecine, peu d'étudiants avaient eu l'occasion de mener un entretien psychiatrique durant leur cursus : un stress anticipatoire a pu s'amender au décours de la simulation. De plus la présence d'interne en guise d'acteur, ainsi qu'un accueil individualisé de chaque étudiant a pu permettre une diminution rapide du niveau de stress perçu.

Concernant l'utilisation de l'interface en condition réelle, le retour très positif des apprenants est une première étape dans la validation d'une pratique pédagogique intégrant une détection des niveaux de stress. Cette utilité est à pondérer avec un biais de désirabilité sociale des étudiants engagés de manière volontaire dans le processus de recherche. De plus, bien que l'utilisation de la vidéo comme support au débriefing soit largement répandue dans les pratiques pédagogiques, il existe une littérature contradictoire sur son efficacité [76,77]. A terme, il apparaît nécessaire de formaliser les objectifs attendus autour d'une conduite de débriefing spécifique pour pouvoir évaluer de manière plus formelle le bénéfice de notre méthode débriefing augmenté par la détection du stress.

Les données de décembre ainsi que le faible nombre de participants volontaires à la session de juin 2022 n'ont pas permis de créer un jeu de donnée suffisant en termes séquences

étiquetés et utilisables pour servir de vérité de terrain dans le cadre d'un apprentissage supervisé. Le recueil a posteriori du vécu subjectif des simulations entraîne également un biais de mémorisation dans le rappel des différentes séquences. Notre échantillon correspond à une population très spécifique d'étudiant volontaire en second cycle des études de santé et d'interne en 1^{re} année de psychiatrie. Il est nécessaire d'envisager à terme un recrutement plus large que des étudiants en médecine (étudiants en soins infirmiers, en maïeutique, etc.).

Initialement développé pour un seul apprenant en situation de simulation, puis pour deux apprenants, l'interface reste limitée dans de simulations mettant en jeu un travail d'équipe plus important à l'image des soins critiques et des scénarios de réanimation.

Du fait du caractère exploratoire du projet et de l'absence de critère de jugement principal formalisé, la généralisation des résultats de la session de juin 2022 est limitée. À partir de ces 1^{ères} expérimentations pédagogiques, une étude comparative et qualitative pourrait être envisagée afin de justifier d'une généralisation de cette pratique pédagogique. L'utilisation de la méthode dans des scénarios de simulation non psychiatrique sera également nécessaire. L'ensemble des évaluations de la session de juin 2022 est marqué par un biais de désirabilité sociale, par le recrutement au volontariat sur une recherche ouverte sur la détection du stress et la présence.

La transposition des méthodes de détection du stress issues de données standardisées en condition écologique se heurte à l'intégration des patterns de réactivité spécifique possiblement présents en population générale. La simulation d'une prise en charge d'un arrêt cardiaque, ou l'annonce d'un diagnostic grave en lien avec des résonances personnelles pourrait induire des phénotypes de réactivités non étudiées. Ainsi, des phénomènes

dissociatifs tels que la déréalisation ou la dépersonnalisation lors d'une simulation médicale particulièrement éprouvante sur le plan adaptatif sont possibles.

Forces

L'émergence de ce projet de recherche s'intègre une collaboration pluridisciplinaire entre chercheurs en sciences cognitives, cliniciens, formateurs, et informaticiens autour de la simulation en santé comme objet de recherche. L'utilisation de l'IA dans les pratiques pédagogiques s'inscrit dans une démarche innovante d'amélioration de la qualité des débriefings durant une simulation.

Notre méthode s'appuie sur un cadre géométrique pour la détection du stress en utilisant des matrices symétriques positives définies (SPD). Ces représentations des données incorporent la relation de corrélation des signaux physiologiques et comportementaux à partir de la covariance et de la covariance croisée. Il s'agit d'une méthode qui permet à terme d'intégrer différents signaux dans une approche multimodale de détection du stress [70].

La similarité importante des variables entre les données d'entraînement et les données des simulations garantit une meilleure extrapolation du modèle. Cette similarité est permise du fait de l'utilisation du même dispositif portable (Empatica 4) : les caractéristiques des données sont strictement identiques en termes de fréquences d'échantillonnage et technologie des capteurs. Enfin l'utilisation du test de stress social de Trier (TSST) (64) dans la base de données WESAD est une méthode fiable et robuste d'élicitation du stress. Le test consiste en une épreuve de prise de parole en public et une épreuve de calcul mental.

L'utilisation de méthode de géométrie riemannienne reste peu utilisé dans le champ de la détection de stress, néanmoins il existe une littérature et des données dans le domaine des

interfaces hommes-machines sur les signaux EEG notamment dans des environnements naturels [78], mais aussi dans le domaine de la détection des crises d'épilepsie [79] ou la reconnaissance d'émotion [80]. De plus, l'utilisation d'un réseau de neurones de type LSTM tend vers un fonctionnement plus bio inspiré avec une intégration parallèle et distribuée des signaux multimodaux.

A partir de cette étude exploratoire il est nécessaire de questionner un certain nombre d'éléments portant sur le ML et ses limites dans le domaine des sciences affectives. Son utilisation à des fins pédagogiques sous-tendu par son utilité dans le domaine de l'apprentissage est discutée. Enfin une réflexion éthique est nécessaire aux regards des points cités précédemment pour circonscrire son utilisation de manière pertinente dans l'apprentissage par simulation.

3 Le machine learning dans le domaine des sciences affectives et la détection du système de stress

2.1 Une absence de consensus

Il n'existe pas encore de consensus scientifique stable sur l'utilisation d'une méthode particulière de détection des patterns physiologiques liés au système de stress ou aux émotions [81]. Une multitude d'algorithmes est utilisée dans le domaine de la reconnaissance affective [29]. Elles dépendent notamment des caractéristiques utilisées dans l'enregistrement des données, des types et des objectifs des algorithmes utilisés (classification ou régression notamment).

De même l'absence de modèle explicatif sous-jacent à la logique des algorithmes de classification amène une approche empirique par comparaison successive des différents

modèles autour de leurs performances. Cet effet « boîte noire » [82] reste une question de recherche à part entière. De même, l'augmentation du nombre de modalités peut augmenter les performances des algorithmes [83], sans pour autant fournir des explications sur les différentes combinaisons pertinentes. La complexité des variables d'entrée, de leurs relations, et des paramètres des différentes couches de neurones artificiels représentent des espaces à haute dimensionnalité, difficile à la représentation pour un être humain. De même, le saut de dimension lié à la détection du système de stress en condition expérimentale contrôlée à un environnement naturel représente un défi majeur dans le domaine de l'apprentissage automatique [84].

3.2 La complexité des systèmes biologiques

À partir de la réfutation des notions de causalité linéaire, le domaine de la biologie se confronte à la notion de complexité [85] [86]. Dans le domaine des sciences affectives et de la détection du système de stress, cette complexité est majorée par une terminologie floue et permissive des notions autour du système de stress. La confusion entre les facteurs de stress, le système de stress, et les conséquences autour du même vocable augmente l'hétérogénéité des résultats (et des méthodes expérimentales). Le stress « physique », « mentale », ou « sociale » recouvre des réalités physiologiques différentes [42].

De même l'hypothèse qu'une certaine fixité des patterns physiologiques et comportementaux lié au système de stress sont objectivables par l'ensemble des capteurs repose sur un modèle théorique discret du stress. Notre modèle de détection du stress se base sur les hypothèses suivantes :

À partir des données WESAD sur lequel notre algorithme a été entraîné : nous considérons que les participants présentent des patterns physiologiques en lien avec un contexte interne d'état d'activation du système de stress. D'un point de vue probabilité nous pouvons décrire cette relation comme :

Probabilité (Ensemble de patterns physiologiques (AED, BVP, TEMP) | État de stress)

Alors, par inférence inverse, dans les données PRESAGE, il existe une probabilité P de détecter un état de stress sachant la présence de l'ensemble des patterns physiologiques.

C'est à dire :

$P(\text{État de stress de l'apprenant} \mid \text{Ensemble de patterns physiologiques (AED, BVP, TEMP)})$

Cette inférence inverse dans le champ des probabilités et des études en neurosciences est largement décrite[87]. L'engagement dans un processus cognitif et émotionnel est déduit de l'activation d'un ensemble de pattern physiologiques et comportementaux. Dans son travail, Poldrack R. [87] présente les inférences inverses comme « un outil supplémentaire (bien qu'imparfait) permettant de faire progresser de l'esprit et du cerveau » et évoque une prudence dans leur interprétation.

De même, Lisa Feldman Barret [88] s'est intéressée à la fiabilité, la spécificité, la généralisabilité et la validité des études en science affective dans le cadre des patterns de motricité faciale dans une méta-analyse récente. En s'opposant à une vision discrète des émotions fondée sur représentation sociale et historique, elle revendique la prise en compte des dimensions contextuelles et propose l'utilisation des nouvelles approches informatiques notamment en lien avec le big data.

3.3 L'avenir de l'apprentissage profond en condition naturelle

Le domaine de l'apprentissage automatique est en pleine progression. En témoigne, l'espace médiatique et les craintes suscitées par la publication et l'utilisation de chatGPT, notamment dans l'enseignement supérieur[89].

Dans le domaine de la recherche en condition naturelle, l'apprentissage profond permet d'envisager d'analyser des processus affectifs complexes, non linéaires et interactifs [84] incarnés par des comportements et marqueurs physiologiques observables. Leurs intérêts résident dans leur caractère peu coûteux (une fois entraînée) et flexible notamment par les possibilités de couplage de différentes architectures [84]. Les éléments multidimensionnels liés au contexte peuvent ainsi être intégrés notamment par les outils de vision par ordinateur. Les relations complexes et non linéaires entre les variables sont également prises en compte dans leurs dimensions spatiales (à l'aide de réseau de convolution ou CNN) ou temporelle (à l'aide de réseau dit récurrent ou RNN). De plus, l'augmentation des capacités de calculs permet d'envisager à terme un traitement des données instantané afin d'implémenter ces outils en temps réel dans des dispositifs d'apprentissage.

4 Le machine Learning et le processus pédagogique

4.1 Innovation technologique et éducation : une histoire ancienne

Il semble important de remettre notre étude dans le temps long de l'histoire [90]. Notre approche, utilisant des algorithmes de machine Learning issus des sciences de

l'informatique, s'inscrit dans le champ de la technologie de l'information et de la communication (TIC - ou encore TICE pour l'éducation). Ce terme historique a été le support de nombreuses recherches et publications, lui-même faisant suite au NTIC (Nouvelle technologie de l'information et de la communication). Notre innovation n'est donc pas si nouvelle. Du tableau au vidéoprojecteur, au Tableau Blanc Interactif (TBI), ou aux logiciels d'aide à l'apprentissage en mathématique, en passant par le développement des MOOC (Massive Open Online Course), les outils numériques participent aux mutations des universités et de l'enseignement supérieur au XXI^e siècle [91].

Une des questions légitimes qui s'impose est l'utilité de ces nouvelles technologies (**Figure 21**) [92]. Leurs utilisations nécessitent une nécessaire évaluation et une validation en contexte naturel d'enseignement, et ainsi ne pas tomber dans l'écueil d'une « technophilie » ou d'un « technosepticisme » [93].

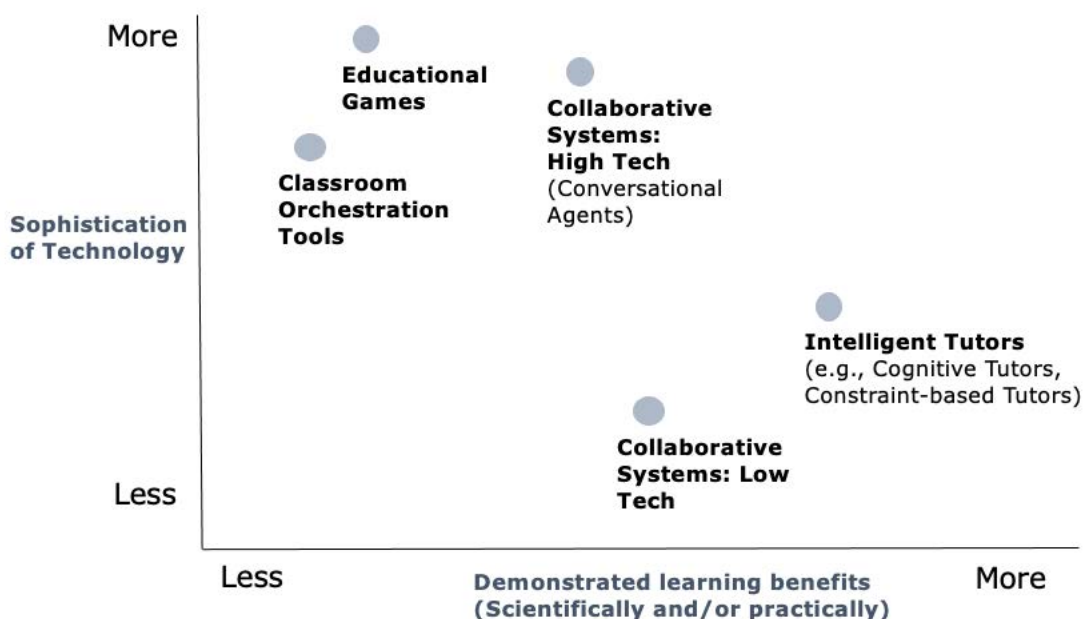


Figure 21 - Compromis entre la sophistication de la technologie et les avantages manifestes de l'apprentissage. D'après [92]

4.2 Le dialogue complexe entre neurosciences et sciences de l'éducation

Le développement des neurosciences et leurs articulations avec les sciences de l'éducation sont relativement récents. Leurs approches épistémologiquement différentes sont parfois peu articulées notamment dans la translation entre les savoirs expérimentaux « en laboratoire » aux savoirs pratiqués dans le contexte d'une classe ou d'une simulation médicale [18].

Notre travail se donne pour objectif d'intégrer les phénomènes émotionnels dans le processus d'apprentissage, en favorisant la notion de processus réflexif sur la base des vidéos des apprenants.

La dimension d'état (plus ou moins probable) d'activation du système de stress comme indicateur d'un événement (interne ou externe) significatif pour l'apprenant s'inscrit d'une démarche d'étude des phénomènes émotionnelles dans l'apprentissage. Il s'agit de favoriser la notion de processus réflexif sur la base des vidéos des simulations apprenants. Sur le plan des sciences de l'éducation, notre dispositif interroge la place du professeur dans le débriefing. De même l'utilisation des vidéos en guise de support aux discussions modifie la dynamique des échanges durant le débriefing.

5 Le Machine Learning et les enjeux éthiques

Notre projet a fait l'objet d'une autorisation du comité d'éthique de l'université de Lille, conformément au standard attendu dans le domaine de la recherche. Une attention a été portée au respect du consentement des participants, à leurs informations et à la gestion et

au traitement des données. Néanmoins, une réflexion plus large sur l'utilisation de l'IA en contexte de recherche et de pédagogie est indispensable.

Pour éclairer les enjeux éthiques liés à notre dispositif, nous proposons de nous appuyer sur la déclaration de Montréal pour un développement de responsable de l'intelligence artificielle [94]. Cette déclaration est issue d'un processus délibératif, participatif, et collégial porté par l'université de Montréal en 2017. Son inscription dans le domaine de l'enseignement supérieur et de la recherche renforce son utilité pour penser notre projet. Le texte fixe comme triple objectif de :

1. Arbitrer collectivement les controverses éthiques et sociétales sur l'IA
2. Améliorer la qualité de la réflexion sur l'IA responsable
3. Renforcer la légitimité des propositions pour une IA responsable

Le texte énonce 10 principes éthiques généraux autour des valeurs suivantes : le bien-être, l'autonomie, l'intimité et la vie privée, la solidarité, la démocratie, l'équité, l'inclusion, la prudence, la responsabilité et la soutenabilité environnementale, principes éthiques qui serviront d'appui à notre réflexion.

Le principe du bien être

Un point de vigilance concerne la détection des patterns et la classification des patterns de réactivités physiologiques de notre algorithme. Bien que la finalité soit centrée sur une amélioration des débriefings et plus globalement de l'apprentissage en simulation, on peut se questionner sur le risque lié à l'augmentation paradoxale du niveau d'activité du système de stress des apprenants. En effet, se confronter à son propre niveau d'activation ou se comparer avec les autres membres du groupe, pourrait participer à stigmatisation des

apprenants, voire à l'auto-stigmatisation. La notion de « stress » véhicule de nombreux stéréotypes pour la plupart négatif dans le domaine de la santé mentale [95].

Néanmoins la facilitation des discussions observées lors du débriefing pourrait s'inscrire dans une levée des phénomènes d'inhibition des apprenants et un renforcement de leurs implications par l'observation de leurs réactions respectives.

Le principe de respect de l'autonomie

Bien qu'ils s'agissent d'augmenter le contrôle des individus sur le propre niveau d'activation en termes de stress, il est important que notre dispositif ne soit pas utilisé à des fins d'évaluation (cf. le principe de prudence), ni même de surveillance de l'implication des apprenants.

Le principe de protection de l'intimité et de la vie privée

La participation volontaire et active à ce dispositif fondamental. En effet, la simulation en santé doit garantir un « espace d'intimité dans lesquels les personnes ne sont pas soumises [...] à une évaluation numérique ». L'usage du dispositif doit être circonscrit à la séquence de simulation, pour garantir « l'intimité des pensées et des émotions » des apprenants.

La confidentialité et l'anonymisation des données est également indispensable, avec un stockage et usage strictement réservé au projet initial.

Le principe de participation démocratique

Le fonctionnement de notre algorithme et les modalités de classification est limité dans son intelligibilité du fait de l'utilisation du Deep Learning. Cet effet « boîte noire » des réseaux de neurones artificiels est bien décrit [26,82] et limite la transparence et les possibilités de discussion sur la justification ayant amené à la classification des différentes périodes.

Le principe d'inclusion de la diversité

L'entraînement de notre algorithme sur les données de WESAD ne garantit pas suffisamment la diversité des données. La problématique des échantillons de type WEIRD, l'acronyme anglais pour « occidentaux, éduqués, industrialisés, riches et démocratiques » est connue et limite la généralisation de notre méthode. Ce biais dans les données d'apprentissage participe à la diminution de la reproductibilité des études scientifiques.

De même l'importance des multiples modalités d'expression comportementales des émotions en lien avec la diversité des cultures et de l'origine sociale des apprenants nécessite une prudence dans la généralisation de nos résultats en l'état.

Le principe de prudence

La prise en compte des éventuels doubles usages de notre algorithme et plus généralement dans la recherche dans le domaine des algorithmes d'apprentissage automatique est nécessaire. Une anticipation de ces éventuels mésusages doit faire partie intégrante du programme de développement.

Conclusion

À travers ce travail exploratoire multidisciplinaire, une recherche en pédagogie centrée sur les processus affectifs semble s'ouvrir. La généralisation des techniques d'apprentissage utilisant les réseaux de neurones artificiels et l'utilisation de nouvelles technologies en simulation s'inscrit dans de multiples carrefours. Au croisement des neurosciences et de la pédagogie, de l'informatique et des sciences affectives, mais aussi au croisement des (futurs) possibilités techniques et des limites éthiques. Objet de recherche actuel, la stabilisation de méthode robuste de détection des réactions du système de stress en condition naturelle est une question non encore pleinement non résolue. À terme, le débriefing augmenté par l'IA appartient à un futur dont nous sommes particulièrement proches.

Références

- [1] Simulation en santé. Haute Autorité de Santé
- [2] L'évolution et le rôle de la simulation dans l'éducation médicale [Internet]. Anesthesia Patient Safety Foundation. [
- [3] Benkhadra M. Le cadavre. In: Boet S, Savoldelli G, Granry J-C, editors. La simulation en santé De la théorie à la pratique, Paris: Springer; 2013, p. 75–80.
- [4] Mannequin pédagogique d'accouchement. Muséum national d'Histoire naturelle
- [5] Houssaye J. Pédagogie et sciences de l'éducation : pas facile ! Les Sciences de l'éducation - Pour l'Ere nouvelle 2019;52:11–27.
- [6] Pottier P. Théories de l'apprentissage et simulation Le point de vue du professionnel de santé-enseignant. In: Boet S, Savoldelli G, Granry J-C, editors. La simulation en santé De la théorie à la pratique, Paris: Springer; 2013, p. 15–24.
- [7] Houssaye J. LE TRIANGLE PÉDAGOGIQUE OU COMMENT COMPRENDRE LA SITUATION PÉDAGOGIQUE. Recherche En Soins Infirmiers 1994.
- [8] Knowles: Andragogy in action - Google Scholar
- [9] Schön DA. Educating the reflective practitioner: Toward a new design for teaching and learning in the professions. San Francisco, CA, US: Jossey-Bass; 1987.
- [10] Balleux A. Évolution de la notion d'apprentissage expérientiel en éducation des adultes: vingt-cinq ans de recherche. rse 2000;26:263–86.
- [11] Aucouturier B. Le jeu de l'enfant. Agir, jouer, penser, Louvain-la-Neuve: De Boeck Supérieur; 2017, p. 13–21.
- [12] Bailly R. Le jeu dans l'œuvre de D.W. Winnicott. Enfances & Psy 2001;15:41–5.
- [13] Issenberg SB, McGaghie WC, Petrusa ER, Lee Gordon D, Scalese RJ. Features and uses of high-fidelity medical simulations that lead to effective learning: a BEME systematic review. Med Teach 2005;27:10–28.
- [14] Freeman S, Eddy SL, McDonough M, Smith MK, Okoroafor N, Jordt H, et al. Active learning increases student performance in science, engineering, and mathematics. Proc Natl Acad Sci U S A 2014;111:8410–5.

- [15] Chiniara G, Cole G, Brisbin K, Huffman D, Cragg B, Lamacchia M, et al. Simulation in healthcare: A taxonomy and a conceptual framework for instructional design and media selection. *Medical Teacher* 2013;35:e1380–95.
- [16] Arboix-Calas F. Neurosciences cognitives et sciences de l'éducation : vers un changement de paradigme ? *Éducation et socialisation Les Cahiers du CERFEE* 2018.
- [17] Les neuro-sciences et sciences cognitives, qu'est ce que c'est ? Institut du Cerveau
- [18] Chamak B. Neurosciences et sciences cognitives : relations complexes. *Intellectica* 2018;69:133–48.
- [19] informatique | Dictionnaire de l'Académie française | 9e édition n.d.
- [20] Copeland BJ. *The Essential Turing*. Clarendon Press; 2004.
- [21] Russell S, Norvig P. *Intelligence artificielle*. Pearson Education France; 2010.
- [22] Chabert J-L, Barbin E, editors. *Histoire d'algorithmes: du caillou à la puce*. Paris: Belin; 2010.
- [23] Miller GA. The cognitive revolution: a historical perspective. *Trends in Cognitive Sciences* 2003;7:141–4.
- [24] SCIENCES COGNITIVES - Encyclopædia Universalis
- [25] McCulloch WS, Pitts W. A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity. *Bulletin of Mathematical Biophysics* 1943;5:115–33.
- [26] Mermillod M. Réseaux de neurones biologiques et artificiels: Vers l'émergence de systèmes artificiels conscients ? De Boeck Supérieur; 2016.
- [27] Mullen J. Computer scores big victory against humans in ancient game of Go. *CNNMoney* 2016.
- [28] Brunelle F, Brunelle P. Intelligence artificielle et imagerie médicale : définition, état des lieux et perspectives. *Bulletin de l'Académie Nationale de Médecine* 2019;203:683–7.
- [29] Schmidt P, Reiss A, Dürichen R, Van Laerhoven K. Wearable-Based Affect Recognition—A Review. *Sensors (Basel)* 2019;19.
- [30] D'mello SK, Kory J. A Review and Meta-Analysis of Multimodal Affect Detection Systems. *ACM Comput Surv* 2015;47:43:1-43:36.
- [31] Gedam S, Paul S. A Review on Mental Stress Detection Using Wearable Sensors and Machine Learning Techniques. *IEEE Access* 2021;9:84045–66.

- [32] Elzeiny S, Qaraqe M. Machine Learning Approaches to Automatic Stress Detection: A Review. 2018 IEEE/ACS 15th International Conference on Computer Systems and Applications (AICCSA), 2018, p. 1–6.
- [33] Gedam S, Paul S. A Review on Mental Stress Detection Using Wearable Sensors and Machine Learning Techniques. *IEEE Access* 2021;9:84045–66.
- [34] Selye H. A Syndrome produced by Diverse Nocuous Agents. *Nature* 1936;138:32–32.
- [35] Mason JW. A re-evaluation of the concept of “non-specificity” in stress theory. *J Psychiatr Res* 1971;8:323–33.
- [36] Kagan J. An Overly Permissive Extension. *Perspect Psychol Sci* 2016;11:442–50.
- [37] McEwen BS, Bowles NP, Gray JD, Hill MN, Hunter RG, Karatsoreos IN, et al. Mechanisms of stress in the brain. *Nat Neurosci* 2015;18:1353–63.
- [38] Selye H. Confusion and controversy in the stress field. *J Human Stress* 1975;1:37–44.
- [39] Calabrese EJ. Stress biology and hormesis: the Yerkes-Dodson law in psychology--a special case of the hormesis dose response. *Crit Rev Toxicol* 2008;38:453–62.
- [40] Sterling P, Eyer J. Allostasis: A new paradigm to explain arousal pathology. *Handbook of life stress, cognition and health*, Oxford, England: John Wiley & Sons; 1988, p. 629–49.
- [41] McEwen BS, Stellar E. Stress and the Individual: Mechanisms Leading to Disease. *Archives of Internal Medicine* 1993;153:2093–101.
- [42] Goldstein D, Kopin I. Evolution of concepts of stress. *Stress (Amsterdam, Netherlands)* 2007;10:109–20.
- [43] Koolhaas JM, Bartolomucci A, Buwalda B, de Boer SF, Flügge G, Korte SM, et al. Stress revisited: a critical evaluation of the stress concept. *Neurosci Biobehav Rev* 2011;35:1291–301.
- [44] Goldstein DS, McEwen B. Allostasis, Homeostats, and the Nature of Stress. *Stress* 2002;5:55–8.
- [45] Timmers I, Quaedflieg CWEM, Hsu C, Heathcote LC, Rovnaghi CR, Simons LE. The interaction between stress and chronic pain through the lens of threat learning. *Neurosci Biobehav Rev* 2019;107:641–55.
- [46] Moisan M-P, Le Moal M. Le stress dans tous ses états. *Med Sci (Paris)* 2012;28:612–7.

- [47] Lazarus RS. Coping theory and research: past, present, and future. *Psychosom Med* 1993;55:234–47.
- [48] Rodrigues SM, LeDoux JE, Sapolsky RM. The influence of stress hormones on fear circuitry. *Annu Rev Neurosci* 2009;32:289–313.
- [49] Ekman P. An argument for basic emotions. *Cognition and Emotion* 1992;6:169–200.
- [50] Feldman Barrett L, Russell JA. Independence and bipolarity in the structure of current affect. *Journal of Personality and Social Psychology* 1998;74:967–84.
- [51] Giannakakis G, Grigoriadis D, Giannakaki K, Simantiraki O, Roniotis A, Tsiknakis M. Review on Psychological Stress Detection Using Biosignals. *IEEE Transactions on Affective Computing* 2022.
- [52] Cannon WB. ORGANIZATION FOR PHYSIOLOGICAL HOMEOSTASIS. *Physiological Reviews* 1929;9:399–431.
- [53] Kunz E. Henri Laborit and the inhibition of action. *Dialogues in Clinical Neuroscience* 2014;16:113–7.
- [54] Alberdi A, Aztiria A, Basarab A. Towards an automatic early stress recognition system for office environments based on multimodal measurements: A review. *J Biomed Inform* 2016;59:49–75.
- [55] Lefter I, Burghouts G, Rothkrantz L. Recognizing stress using semantics and modulation of speech and gestures. *IEEE Transactions on Affective Computing* 2016:1–1.
- [56] Tzirakis P, Chen J, Zafeiriou S, Schuller B. End-to-end multimodal affect recognition in real-world environments. *Information Fusion* 2021;68:46–53.
- [57] Joëls M, Pu Z, Wiegert O, Oitzl MS, Krugers HJ. Learning under stress: how does it work? *Trends in Cognitive Sciences* 2006;10:152–8.
- [58] Cremer A, Kalbe F, Gläscher J, Schwabe L. Stress reduces both model-based and model-free neural computations during flexible learning. *NeuroImage* 2021;229:117747.
- [59] Schmidt P, Reiss A, Dürichen R, Marberger C, Laerhoven KV. Introducing WESAD, a Multimodal Dataset for Wearable Stress and Affect Detection. *ICMI* 2018.
- [60] Kirschbaum C, Pirke KM, Hellhammer DH. The 'Trier Social Stress Test'--a tool for investigating psychobiological stress responses in a laboratory setting. *Neuropsychobiology* 1993;28:76–81.
- [61] Boucsein W. *Electrodermal Activity*. Springer Science & Business Media; 2012.

- [62] Alexander DM, Trengove C, Johnston P, Cooper T, August JP, Gordon E. Separating individual skin conductance responses in a short interstimulus-interval paradigm. *J Neurosci Methods* 2005;146:116–23.
- [63] Greco A, Valenza G, Lanata A, Scilingo EP, Citi L. cvxEDA: A Convex Optimization Approach to Electrodermal Activity Processing. *IEEE Trans Biomed Eng* 2016;63:797–804.
- [64] Peper E, Harvey R, Lin I-M, Tylova H, Moss D. Is There More to Blood Volume Pulse Than Heart Rate Variability, Respiratory Sinus Arrhythmia, and Cardiorespiratory Synchrony? *Biofeedback* 2007;35:54–61.
- [65] Pham T, Lau ZJ, Chen SHA, Makowski D. Heart Rate Variability in Psychology: A Review of HRV Indices and an Analysis Tutorial. *Sensors* 2021;21:3998.
- [66] Herborn KA, Jerem P, Nager RG, McKeegan DEF, McCafferty DJ. Surface temperature elevated by chronic and intermittent stress. *Physiol Behav* 2018;191:47–55.
- [67] Bradley MM, Lang PJ. Measuring emotion: The self-assessment manikin and the semantic differential. *Journal of Behavior Therapy and Experimental Psychiatry* 1994;25:49–59.
- [68] Kramer U, Grandjean L, Beuchat H. Chapter 18 - Emotions in clinical practice. In: Meiselman HL, editor. *Emotion Measurement (Second Edition)*, Woodhead Publishing; 2021, p. 595–612.
- [69] Gjoreski M, Lutrek M, Gams M, Gjoreski H. Monitoring stress with a wrist device using context. *J of Biomedical Informatics* 2017;73:159–70.
- [70] Wu Y, Daoudi M, Amad A, Sparrow L, D'Hondt F. Unsupervised Learning Method for Exploring Students' Mental Stress in Medical Simulation Training. Companion Publication of the 2020 International Conference on Multimodal Interaction, New York, NY, USA: Association for Computing Machinery; 2020, p. 165–70.
- [71] Bengio Y, Simard P, Frasconi P. Learning long-term dependencies with gradient descent is difficult. *IEEE Transactions on Neural Networks* 1994;5:157–66.
- [72] Hochreiter S, Schmidhuber J. Long short-term memory. *Neural Comput* 1997;9:1735–80.
- [73] Ruder S. An overview of gradient descent optimization algorithms 2017.
- [74] Huynh L, Nguyen T, Nguyen T, Pirttikangas S, Siirtola P. StressNAS: Affect State and Stress Detection Using Neural Architecture Search. *UbiComp/ISWC Adjunct* 2021.

- [75] Plarre K, Raij A, Hossain SM, Ali AA, Nakajima M, Al'absi M, et al. Continuous inference of psychological stress from sensory measurements collected in the natural environment. *Proceedings of the 10th ACM/IEEE International Conference on Information Processing in Sensor Networks*, 2011, p. 97–108.
- [76] Chronister C, Brown D. Comparison of Simulation Debriefing Methods. *Clinical Simulation in Nursing* 2012;8:e281–8.
- [77] Sawyer T, Sierocka-Castaneda A, Chan D, Berg B, Lustik M, Thompson M. The Effectiveness of Video-Assisted Debriefing Versus Oral Debriefing Alone at Improving Neonatal Resuscitation Performance: A Randomized Trial. *Simulation in Healthcare* 2012;7:213–21.
- [78] Congedo M, Barachant A, Bhatia R. Riemannian geometry for EEG-based brain-computer interfaces; a primer and a review 2017;4:155–74.
- [79] Yuan S, Zhou W, Wu Q, Zhang Y. Epileptic Seizure Detection with Log-Euclidean Gaussian Kernel-Based Sparse Representation. *Int J Neural Syst* 2016;26:1650011.
- [80] Abdel-Ghaffar EA, Wu Y, Daoudi M. Subject-Dependent Emotion Recognition System Based on Multidimensional Electroencephalographic Signals: A Riemannian Geometry Approach. *IEEE Access* 2022;10:14993–5006.
- [81] Ladakis I, Chouvarda I. *Overview of Biosignal Analysis Methods for the Assessment of Stress*, 2021.
- [82] The Dark Secret at the Heart of AI. *MIT Technology Review*
- [83] Bota PJ, Wang C, Fred ALN, Placido Da Silva H. A Review, Current Challenges, and Future Possibilities on Emotion Recognition Using Machine Learning and Physiological Signals. *IEEE Access* 2019;7:140990–1020.
- [84] Lin C, Bulls LS, Tepfer L, Vyas AD, Thornton MA. Advancing naturalistic affective science with deep learning 2023.
- [85] Koch C. Modular Biological Complexity. *Science* 2012;337:531–2.
- [86] Goldenfeld N, Kadanoff LP. Simple Lessons from Complexity. *Science* 1999;284:87–9.
- [87] Poldrack RA. Can cognitive processes be inferred from neuroimaging data? *Trends in Cognitive Sciences* 2006;10:59–63.
- [88] Barrett LF, Adolphs R, Marsella S, Martinez AM, Pollak SD. Emotional Expressions Reconsidered: Challenges to Inferring Emotion From Human Facial Movements. *Psychol Sci Public Interest* 2019;20:1–68.

- [89] ChatGPT : Sciences Po fixe des règles et lance une réflexion sur l'IA dans l'enseignement supérieur. Sciences Po
- [90] Les technologies dans l'enseignement scolaire : regard rétrospectif et perspectives | Cairn.info.
- [91] Poteaux N. Pédagogie de l'enseignement supérieur en France : état de la question. Distances et médiations des savoirs Distance and Mediation of Knowledge 2013;1.
- [92] Nouveaux outils et perspectives - Les technologies avancées pour l'apprentissage dans la salle de classe
- [93] Simonian S. Réhabiliter l'Homme avec la technologie. Recherches en éducation 2014.
- [94] La Déclaration de Montréal en IA responsable. declarationiaresp n.d. <https://www.declarationmontreal-iaresponsable.com/la-declaration>
- [95] Clement S, Schauman O, Graham T, Maggioni F, Evans-Lacko S, Bezborodovs N, et al. What is the impact of mental health-related stigma on help-seeking? A systematic review of quantitative and qualitative studies. Psychological Medicine 2015;45:11–27.

Annexes

1 Scénario Agitation & éléments de trame

Objectifs pédagogiques

- Diagnostiquer une agitation
- Identifier les caractéristiques d'urgence de la situation
- Savoir appeler à l'aide
- Prendre le leadership. C'est lui ou elle qui devra (a priori) rester en contact relationnel avec le patient et lui expliquer ce qui est en train d'être fait et pourquoi. L'objectif devant être la prise de décision de contention (**mais ne pas donner cette consigne explicite aux étudiants avant de faire la séance**).

Mise en situation :

2 internes (premier semestre) appelés pour réaliser l'examen d'entrée du patient car semble agité

1 autre interne de premier semestre (a déjà fait quelques gardes de FFI) de garde le même soir pouvant être appelé en renfort.

1 IDE

Contexte de la situation

Sujet de 23 ans déposé aux urgences par des « amis » de soirée qui sont partis immédiatement. Ont dit à l'IAO que le sujet avait pris de la cocaïne pendant la soirée et l'ont ramené car est allé au balcon en disant qu'il savait voler.

Le patient/ la patiente

- Accélération motrice et comportementale :
 - Agitation motrice, hyperactivité souvent stérile,
 - Augmentation de l'énergie
 - Logorrhée (augmentation du temps de parole).
 - Tachyphémie (augmentation de la vitesse de parole).
 - Hypermimie (augmentation des expressions du visage),
 - Désinhibition (Ludisme, contact familial).
- Accélération des pensées :
 - Tachypsychie (accélération des idées).
 - Pensée diffluente, fuites des idées (impression que les idées fusent).
 - Coqs à l'âne (changement rapide d'une idée à l'autre sans lien apparent).
 - Jeux de mots, associations par assonances.
- Contenu du discours et détails

- Pense être le futur Dalai-lama ; veut aller en Inde pour en informer le Dalai-Lama actuel et se rendre après avec lui au Tibet. Pas d'agressivité (car le Bouddha est non violent !) mais souhaite sortir de l'Hôpital pour aller à Lesquin. Souhaite également ouvrir la voie aux soignants.
- Insistance physique pour s'en aller mais ré-accroche systématiquement à la discussion. Consigne de s'adresser à tous les soignants.
- Refus ferme des traitements per os (= pris par la bouche).

Répartition et rôle des étudiants lors du scénario

- 2 internes (premier semestre) appelés pour réaliser l'examen d'entrée du patient car semble agité
- Un autre interne appelé en renfort censé prendre le leadership. C'est lui ou elle qui devra (a priori) rester en contact relationnel avec le patient et lui expliquer ce qui est en train d'être fait et pourquoi. L'objectif devant être la prise de décision de contention (**mais ne pas donner cette consigne explicite aux étudiants avant de faire la séance**).
- 1 IDE qui devra assurer la contention sans violence de ce patient, tout en gardant si nécessaire un contact relationnel en cas d'interpellation par le patient.

Scénario expliqué à l'équipe médicale et paramédicale

Le patient est manifestement dans un état d'agitation aigüe, présente une symptomatologie psychiatrique et risque de fuguer. Sa famille est prévenue et était inquiète car n'avait pas de nouvelles depuis plusieurs semaines. Les parents et la sœur arrivent mais habitent dans le Pas-de-Calais. Il faut trouver une solution car le patient souhaite absolument partir et ne pourra être surveillé en permanence.

Le premier interne entre en premier. Ils débudent l'interrogatoire du patient.

L'équipe est briefée sur le matériel à disposition. Il faut empêcher le sujet de fuguer (sans donner de consigne explicite sur la contention).

Insister avant que le reste de l'équipe ne rentre qu'il faut vraiment se mettre en situation.

○

2 Scénario Risque suicidaire & éléments de trame

Objectifs

- Savoir repérer les signes évocateurs de la présence d'idées suicidaires
- Savoir mettre au jour des idées suicidaires
- Savoir évaluer le risque, l'urgence et la dangerosité suicidaire
- Savoir prendre les décisions adaptées au niveau d'urgence et de dangerosité suicidaire évalué

Contexte de la situation

Mme Verendrie consulte aux urgences pour des douleurs thoraciques intenses d'apparition brutale.

Mme Verendrie est une femme de 52 ans. Actuellement engagée dans une procédure de divorce, elle a 2 enfants de 16 et 22 ans qui vivent à sa charge. Son ex-époux l'a quittée il y a maintenant 6 mois. Comme il représentait la principale source de revenus du foyer, Mme Verendrie a dû déménager dans un logement plus petit, dans lequel elle ne se sent pas bien.

Mme Verendrie a pour seul antécédent psychiatrique personnel une tentative de suicide à l'âge de 17 ans, suite à une rupture sentimentale. A l'époque, elle avait bénéficié d'un suivi de quelques mois. Depuis, elle n'a plus vu de psychiatre, n'a pas pris de traitement psychotrope, et n'a pas été hospitalisée en milieu psychiatrique. Elle ne consomme pas de toxique.

Au niveau familial, on note le suicide de sa grand-mère maternelle il y a une dizaine d'années.

L'examen mené par l'interne de garde est rassurant, l'ECG est normal et les troponines reviennent négatives. Il n'y a pas de signe en faveur d'une attaque de panique. En revanche, l'infirmière dit être préoccupée par la discussion qu'elle a eue avec la patiente au moment de prélever son bilan : « Je lui ai demandé si elle était stressée en ce moment. Elle m'a répondu qu'elle se sentait à bout, que si elle pouvait faire une crise cardiaque ça serait pas plus mal. »

Il est demandé à l'interne d'annoncer à la patiente la normalité de son bilan, et de compléter son examen, compte-tenu des nouvelles informations qu'il a à sa disposition. Il est pour cela accompagné de l'infirmière qui a recueilli les propos de la patiente. À noter que dans le service d'urgences où l'interne effectue sa garde, les évaluations psychiatriques spécialisées ne sont effectuées qu'en journée, par un psychiatre d'astreinte.

Scénario expliqué à l'interne

Mme Verendrie est une femme de 52 ans admise aux urgences pour douleurs thoraciques intenses d'apparition brutale. Votre examen clinique est rassurant, l'ECG est normal, et vous venez de recevoir les troponines qui sont négatives. Il n'y a pas de signe en faveur d'une attaque de panique. En revanche, l'infirmière qui a piqué le bilan vous dit être préoccupée par la discussion qu'elle a eue avec la patiente au moment du prélèvement : « Je lui ai demandé si elle était stressée en ce moment. Elle m'a répondu qu'elle se sentait à bout, que si elle pouvait faire une crise cardiaque ce ne serait pas plus mal. »

Il vous est demandé d'annoncer à la patiente la normalité de son bilan, et de compléter votre examen, compte-tenu des nouvelles informations que vous avez en votre disposition.

AUTEUR : Nom : DENIS

Prénom : Thibaut

Date de soutenance : 04/04/2023

Titre de la thèse : Apport du machine learning en simulation médicale : une étude exploratoire de détection du stress en simulation haute fidélité sur le centre PRESAGE

Thèse - Médecine - Lille 2023

Cadre de classement : *Simulation en santé*

DES et option : *Psychiatrie option psychiatrie de l'enfant et de l'adolescent*

Mots-clés : **Simulation en santé, détection du stress, pédagogie médicales, reconnaissance affective,**

Contexte : Le centre de simulation en santé PRESAGE de la faculté de médecine de Lille se donne pour mission de former les étudiants et les professionnels durant des simulations dites en haute-fidélité. Point crucial dans le processus d'apprentissage, les débriefings reposent historiquement sur des méthodes d'analyse subjective des différentes séquences de simulation. En étudiant les phénomènes de stress inhérent à la simulation haute-fidélité, le projet ASH – Adaptive Simulation in Healthcare – se donne pour objectif d'identifier de manière objective l'activation du système de stress des apprenants durant des séquences de simulation afin d'améliorer la qualité des débriefings et ainsi développer une approche centrée sur le vécu interne des étudiants.

Méthode : En partenariat avec le laboratoire CRISTAL (Centre de Recherche en Informatique, Signal et Automatique de Lille) une étude prospective exploratoire a été menée durant les années universitaires 2020-2022. Des internes et des étudiants en santé ont été inclus au volontariat lors de session de simulation sur l'évaluation du risque suicidaire et la gestion d'une agitation. Un dispositif portable non invasif de type EMPATICA© a permis d'enregistrer des variables physiologiques comprenant la conductance électrodermale (AED), la température corporelle (TEMP) et la variabilité du rythme cardiaque (HRV) des participants. L'entraînement de l'algorithme s'est appuyé sur les données publiques WESAD comprenant 15 sujets enregistrés dans des conditions expérimentales. Les résultats de notre méthode de classification ont été confrontés à un ensemble de mesures subjectives répétées afin de contrôler la vérité de terrain. À partir de l'ensemble de ces données, le projet s'est articulé autour de quatre grandes étapes : le développement d'un algorithme de détection intégrant des données multimodales, le contrôle de la vérité de terrain, la création d'une interface graphique, et un test en condition réelle.

Résultats : Nous avons développé un algorithme de classification des séquences de simulation en utilisant un cadre géométrique riemannien associé à un réseau de neurones artificiel de type Long Short Term Memory (LSTM). La méthode s'est révélée conforme à l'état de l'art avec un taux de précision de 93,47% et un F1 Score de 93,25%. L'utilisation exploratoire de l'interface en condition réelle a montré un niveau de satisfaction positif.

Conclusion : Il s'agit d'une première preuve de concept de la faisabilité et de l'utilité d'une méthode de détection du système de stress se basant sur un cadre géométrique riemannien. Néanmoins, la généralisation de ces méthodes reste limitée par des concepts trop permissifs et des modèles expérimentaux n'intégrant pas suffisamment la dimension contextuelle des signaux. Enfin l'acceptabilité dans le domaine de la pédagogie nécessite une réflexion éthique attentive.

Composition du Jury : Président : Professeur Renaud JARDRI

Assesseur : Professeur Mohamed DAOUDI

Directeur de thèse : Professeur Ali AMAD